

**О ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВАХ
ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ
В ПРЕССОВОМ СОЕДИНЕНИИ
КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ВАГОНА**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
УПРОЧНЯЮЩЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ВИНТОВЫХ ПРУЖИН ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

**ОСОБЕННОСТИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ
ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ВЫПУСКНОМ КОЛЛЕКТОРЕ АВТОМОБИЛЬНОГО
ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ РАЗМЕРНОСТИ 8,2/7,1**

**ФОРМИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНОГО УЗЛА
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ АВТОМОБИЛЬНОГО
И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**



Наши дорогие авторы и читатели! В июне «Транспорту Урала» исполнилось 20 лет!

В 2004 году журнал стал не только знаковым событием для родного вуза (первый в истории Уральского государственного университета путей сообщения научный журнал), но и еще одним изданием, публикующим статьи о важнейших проблемах, целях, задачах транспортной отрасли, об исследованиях, разработках и достижениях транспортной науки.

Сегодня «Транспорт Урала» — это широко известный и авторитетный журнал, с 2010 года он входит в перечень ведущих рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук. Мы горды, что за годы существования журнала многие наши авторы, сначала публиковавшиеся как аспиранты, стали кандидатами и докторами наук, и счастливы, что в этом есть и частица нашего вклада.

Мы очень благодарны основателям «Транспорта Урала» — Александру Васильевичу Ефимову и Василию Михайловичу Саю, всем тем, кто на протяжении этих 20 лет печатался в нашем журнале, всем тем, кто помогал и помогает делать журнал интересным, полезным и уважаемым научным изданием! И, конечно, очень ждем статей от наших постоянных и от новых авторов! До встречи на страницах «Транспорта Урала»!

Редакция журнала «Транспорт Урала»

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 Vasilii 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 Vasilii 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

П. А. Козлов, О. В. Осокин, Н. В. Якушев.
О теоретических основах транспортной технологии 3

П. А. Козлов, С. П. Вакуленко, О. В. Осокин, Н. В. Якушев.
Об устойчивости транспортных систем 11

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

С. В. Кротов, Д. П. Кононов, А. П. Буйносов.
Прогнозирование скольжения в прессовом соединении колесной пары вагона 16

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

Д. В. Муравьев, А. В. Обрывалин.
Математическое моделирование упрочняющей термической обработки винтовых пружин подвижного состава 22

М. В. Жуйков, А. Э. Павлюков, А. В. Смольянинов.
Моделирование аварийного столкновения грузового локомотива с полувагоном в порожнем и груженом состоянии 29

И. А. Менщиков, А. С. Космодамианский, С. И. Баташов, А. А. Фатеев.
Диагностика неисправностей тягового электродвигателя электропоезда ЭД9Т методом спектрального анализа тока в обмотке якоря 35

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

А. В. Гриценко, К. В. Глемба, А. В. Старунов, А. С. Меньшенин, С. А. Чокой.
Экспериментальные исследования изменения коэффициента избытка воздуха и свободного кислорода в отработавших газах бензинового ДВС 41

Л. В. Плотников, О. В. Комаров, Д. А. Давыдов, Д. Н. Красильников, В. А. Шурупов.
Особенности нестационарных тепломеханических процессов в выпускном коллекторе автомобильного поршневого двигателя размерности 8,2/7,1 49

В. И. Карагодин, Л. Л. Зиманов.
Обоснование состава и периодичности выполнения контрольно-диагностических и восстановительных операций при техническом обслуживании автомобилей 56

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

С. П. Вакуленко, А. К. Головнич, Н. Ю. Евреенова.
Формирование транспортно-пересадочного узла при взаимодействии автомобильного и железнодорожного транспорта 62

О. И. Веревкина, В. Э. Иванов.
Исследование безопасности функционирования транспорта с разработкой модели оценки критериальных значений 67

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

А. Н. Попов, И. Д. Вершинин.
Исследование применения LoRa-модуляции на железнодорожном транспорте 72

ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

М. Ю. Карелина, В. Ю. Линник, Ю. Н. Ризаева, А. С. Лукинов.
Повышение эффективности работы пассажирской транспортно-логистической системы 76

И. А. Новиков, А. С. Трошин, В. Ю. Линник, А. А. Акулов.
Международные транспортные коридоры как инструмент организации эффективной транспортно-логистической системы 85

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Б. А. Аржанников, И. С. Цихалевский.
Устройство токосъема с контактного провода трехфазной системы электрической тяги 92

Ю. П. Неугодников, И. П. Неугодников.
Анализ особенностей конструктивного исполнения и направления совершенствования многопульсовых выпрямительно-инверторных преобразователей для тяговых подстанций железных дорог 100

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

P. A. Kozlov, O. V. Osokin, N. V. Yakushev.
On the theoretical foundations of transport technology 3

P. A. Kozlov, S. P. Vakulenko, O. V. Osokin, N. V. Yakushev.
On the sustainability of transport systems 11

RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

S. V. Krotov, D. P. Kononov, A. P. Buynosov.
Prediction of sliding in the press connecting the wheelset of the car 16

ROLLING STOCK AND TRACTION

D. V. Murav'ev, A. V. Obryvalin.
Mathematical modeling of strengthening heat treatment of screw springs of rolling stock 22

M. V. Zhuykov A. E. Pavlyukov, A. V. Smolyaninov.
Simulation of an emergency collision of a freight rolling stock with an empty and loaded gondola car 29

I. A. Menshikov, A. S. Kosmodamianskiy, S. I. Batashov, A. A. Fateev.
Diagnostics of the defects of the ED9T electric train traction motor with the method of spectral analyses of current in the armature winding 35

MOTOR TRANSPORT

A. V. Gritsenko, K. V. Glemba, A. V. Starunov, A. S. Menshenin, S. A. Chokoy.
Experimental studies of changes in the coefficient of excess air and free oxygen in the exhaust gases of a gasoline engine 41

L. V. Plotnikov, O. V. Komarov, D. A. Davydov, D. N. Krasilnikov, V. A. Shurupov.
Features of non-stationary thermal mechanical processes in the exhaust manifold of an automobile piston engine of size 8.2/7.1 49

V. I. Karagodin, L. L. Zimanov.
Rationale of the composition and periodicity of performing the diagnostic and restoration operations when car maintenance is being carried out 56

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

S. P. Vakulenko, A. K. Golovnich, N. Yu. Evreenova.
Transport hub formation under the interaction of motor with railway transport 62

O. I. Verevkina, V. E. Ivanov.
Research of transport operation safety with development of a model for evaluation of criterial values 67

AUTOMATION, TELEMCHANICS AND COMMUNICATION

A. N. Popov, I. D. Vershinin.
Research on the application of LoRa modulation in railway transport 72

TRANSPORT AND LOGISTICS PROCESSES

M. Yu. Karelina, V. Yu. Linnik, Yu. N. Rizaeva, A. S. Lukinov.
Improving efficiency of urban transit system 76

I. A. Novikov, A. S. Troshin, V. Yu. Linnik, A. A. Akulov.
International transport corridors as a tool for organizing an effective transport and logistics system 85

ELECTRIC SUPPLY

B. A. Arzhannikov, I. S. Tsikhalevskiy.
Current-collection device from the contact wire of three-phase electric traction system 92

Yu. P. Neugodnikov, I. P. Neugodnikov.
Analyses of the peculiarities of the structural embodiment of the improvement of multi-pulse rectifying-inverting converters for railways traction substations 100

Научная статья

УДК 656.078:004.94

О теоретических основах транспортной технологии

Петр Алексеевич Козлов¹, Олег Викторович Осокин², Николай Васильевич Якушев³¹Научно-производственный холдинг «СТРАТЕГ», Москва, Россия²ООО «Аналитические и управляющие системы на транспорте «Транспортный алгоритм», Москва, Россия³Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

On the theoretical foundations of transport technology

Petr A. Kozlov¹, Oleg V. Osokin², Nikolay V. Yakushev³¹Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia²«Analytical and controlling systems on transport traffic accidents algorithm» LLC, Moscow, Russia³Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

В статье предлагается рассматривать транспортную технологию с более общих позиций, когда лучше проявляются и сущность технологических решений, и закономерности.

Новый системный подход представлен как методология построения эффективных и устойчивых транспортных систем. Показано, что системная адаптивность создает так называемые динамические резервы, которые обеспечивают устойчивость системы без больших фактических резервов.

Рассмотрена сущность взаимодействия структурных элементов. Доказано, что рассчитывать их параметры без учета взаимного влияния, а также в отрыве от наложенной функции нельзя.

Приведено обоснование того, что отображать структуру, функцию и взаимодействие случайных и управляемых процессов можно только с использованием имитационного моделирования как наиболее корректного метода расчета.

Ключевые слова: транспорт, система, поток, структура, технология, устойчивость, имитационное моделирование

Abstract

The article proposes to consider transport technology from a more general perspective when both the essence of technological solutions and patterns are better demonstrated.

The new systems approach is presented as a methodology for building efficient and sustainable transport systems. It is shown that system adaptability creates so-called dynamic reserves which ensure system stability without large actual reserves.

The essence of the interaction of structural elements is considered. It has been proven that it is impossible to calculate their parameters without taking into account mutual influence in isolation from the imposed function as well.

The justification is given that it is possible to display the structure, function and interaction of random and controlled processes only using simulation modeling as the most correct calculation method.

Keywords: transport, system, flow, structure, technology, stability, simulation

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-3-10

ПРОБЛЕМА

В самом общем виде можно сказать, что транспортная наука ищет структурные и функциональные решения, которые позволят улучшить работу *конкретных* транспортных объектов — железнодорожных станций, узлов и полигонов.

Но в последнее время формируется новый уровень исследований, назовем его «уровень теоретических основ». Это уровень более высокой общности. На этом уровне определяют закономерности технологических процессов и выясняют сущность технологических решений. Здесь используются более абстрактные понятия, относящиеся к широкому классу объектов и процессов.

Подход находится в стадии формирования, поэтому рассмотрим лишь некоторые примеры.

НОВЫЙ СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД

Системные исследования проводились многие годы под разными названиями: теория систем, системный подход, системный анализ. Разброс понятия «система» был весьма широк. Поэтому сконструированные на этой основе теории также были весьма различными [1].

На практике под системным подходом понимается обычно комплексный подход, когда объект рассматривается со всех сторон и анализируются все связи и зависимости между составными частями и процессами. Это не строго сформулированный, расплывчатый подход, который может приносить как корректные, так и не очень корректные результаты.

В публикациях по новому системному подходу утверждается, что он получился не в процессе конструирования — был «подсмотрен» в живой природе. А система — «это форма построения устойчивой и эффективной организованной материи» [2].

Определение понятия «система» звучит так: «система — это целостное образование с активным самоподдержанием, при этом элементы тоже являются системами» [1]. Здесь важны два фактора.

Первый — активное самоподдержание. То есть устойчивость системы обеспечивается в первую очередь адаптацией, а только во вторую очередь — резервами. Действительно, если бы сердце не могло работать адаптивно, то потребовалось бы три сердца: одно — во время сна, второе — при ходьбе, третье — при беге.

Это положение задает важный принцип организации транспортных систем. Значит, в системе есть некоторые системные параметры и есть механизмы их поддержания при случайных внешних воздействиях.

Второй фактор: элементы — тоже системы. Элемент как элемент должен уметь гибко подчиняться требованиям надсистемы для поддержания ее устойчивости. Но элемент как система имеет свои системные параметры и механизмы их поддержания. А все остальное, включая надсистему, он рассматривает как внешнюю среду, с воздействиями которой надо бороться.

Налицо противоречие. По сути, этот подход является прикладной диалектикой. Здесь реализуется закон единства и борьбы противоположностей.

И главная сложность при этом — найти гармонию между противоположными свойствами объекта как элемента и как системы. Любой перекокс приведет к потерям.

АБСТРАКТНЫЙ УРОВЕНЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ И ФУНКЦИИ

На этом уровне легче выявить сущность и закономерности процессов. Здесь для описания используются более абстрактные понятия — поток, канал, бункер.

Поток может быть:

равномерным, когда интервал времени между единицами потока постоянный;

организованным (управляемым), когда ритмы потока совпадают с ритмами канала обслуживания, поэтому очереди не возникает;

дезорганизованным, т.е. неравномерным, который никак не подстраивается к ритмам канала. Частным случаем его является случайный поток, который соответствует требованиям теории вероятностей. Этот поток создает очередь перед каналом;

частично организованным (смешанным), который состоит из двух составляющих — дезорганизованной (случайной) и организованной (управляемой).

В зависимости от соотношения составных частей этот поток способен:

создавать частичную очередь при преобладании первой части;

совсем не создавать очереди при сопоставимом равенстве частей (в этом случае он по свойствам соответствует равномерному потоку);

снижать очередь, создаваемую каналом.

Под каналом понимается любой структурный объект, где выполняется некоторая технологическая операция. Поток в нем проходит без накопления: сколько вошло, столько и вышло. При неравномерной работе канал создает очередь.

Бункер — это резервные пути, где составы ждут освобождения канала. Поток в бункере может проходить с накоплением

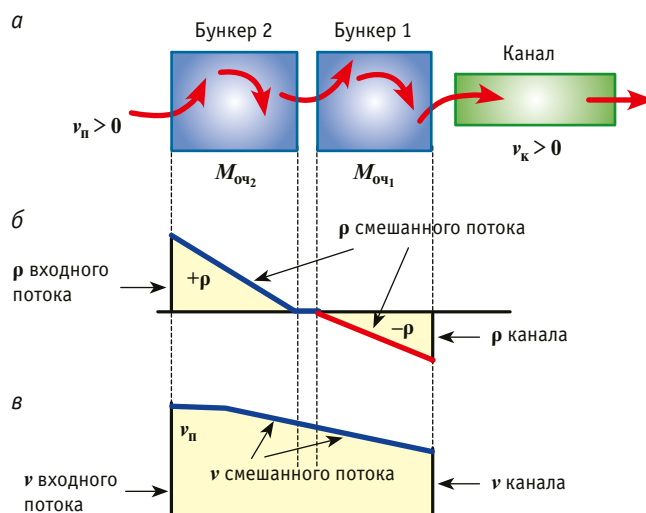


Рис. 1. Абстрактное представление парка резервных путей [4]:

а — схема движения потока в комплексе «бункер — бункер — канал»;

б — уровень дезорганизации потока при его преобразовании;

в — коэффициент вариации потока при его преобразовании;

$M_{оч1}, M_{оч2}$ — средние очереди 1 и 2;

$v_{п}$ и $v_{к}$ — коэффициенты вариации потока и канала соответственно;

ρ — уровень дезорганизации

ем: вошло и не вышло или не вошло, но вышло. Жесткая связь во времени между потоком на входе и на выходе отсутствует.

Описанное представление позволяет легче понять сущность процессов, протекающих в комплексе «бункер — канал» (в дальнейшем будем называть его «дуплекс»). Такая конструкция описывает практически все случаи, где встречается канал обслуживания, будь то сортировочная горка, грузовой фронт и т.п. Там всегда перед каналом есть резервные пути.

Какой процесс происходит на резервных путях? Любой технолог скажет, что составы ждут освобождения канала. Новое представление позволяет выявить сущность процесса. Покажем, что бункер преобразует случайный поток в управляемый [3]. Это его основная функция.

Представим резервные пути как бункер, состоящий из двух частей (рис. 1).

Бункер 2 преобразует случайный поток в смешанный, где составные части равны. Поток в общем случае неравномерный, но с нулевой дезорганизацией. Он не создает очереди и по свойствам соответствует равномерному.

Бункер 1 снижает очередь, создаваемую каналом. В потоке, выходящем из него, управляемая часть больше случайной. При достаточной емкости бункера выходной поток может быть полностью управляемым.

Это и есть сущность процессов, протекающих в комплексе «бункер — канал». Такой вывод имеет непосредственную практическую пользу.

Для исследования этого процесса была построена имитационная модель комплекса «парк — горка» и проведены эксперименты по изменению емкости парка. Оказалось, что реальная перерабатывающая способность горки напрямую зависит

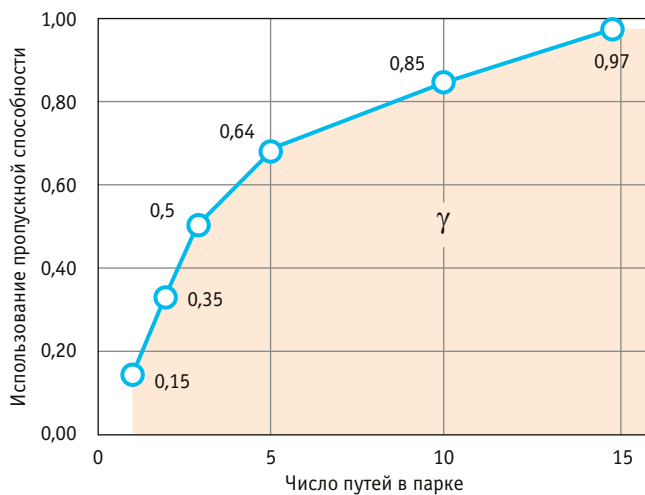


Рис. 2. Зависимость функции горки от структуры парка

от емкости парка перед ней, т.е. от глубины преобразования случайного потока в управляемый (рис. 2)

Этот процесс можно рассмотреть и с противоположной точки зрения: сколько нужно резервных путей в предгорочном парке, чтобы обеспечить заданную перерабатывающую способность горки (рис. 3).

Отсюда следует очень важный теоретический вывод: нельзя рассчитывать пропускную способность любого канала в отрыве от бункера перед ним. Минимальным расчетным элементом может быть только дуплекс. К сожалению, этот принцип напрямую нарушается в существующих инструкциях по расчету железнодорожных станций.

ВЛИЯНИЕ ФУНКЦИИ НА СТРУКТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАСЧЕТНОГО ЭЛЕМЕНТА

В утвержденной инструкции [5] пропускная способность горловины рассчитывается как свойство только структуры, без функционального наполнения. Пропускная способность участка определяется по свойствам ниток графика без учета того, что составы к поездам готовятся на станциях, а поезда обращаются с локомотивами. Теоретический анализ показывает, что такой подход некорректен. Рассмотрим это на примере расчета горловин.

О пропускной способности горловины

Горловина, представляющая собой множество стрелок, увязанное в структуру, на которую наложена «паутина» функциональных связей, формализации не поддается. В инструкции [5] принято такое положение: пропускная способность горловины определяется потоком, который может пропустить наиболее загруженная стрелка при 100 %-й загрузке. Анализ показывает, что этот подход ошибочный.

Ошибка 1. Наиболее загруженная стрелка не обязательно является узким местом. На величину задержек влияет не только уровень, но и характер загрузки: длинными или короткими временными отрезками, более равномерно или неравномерно.

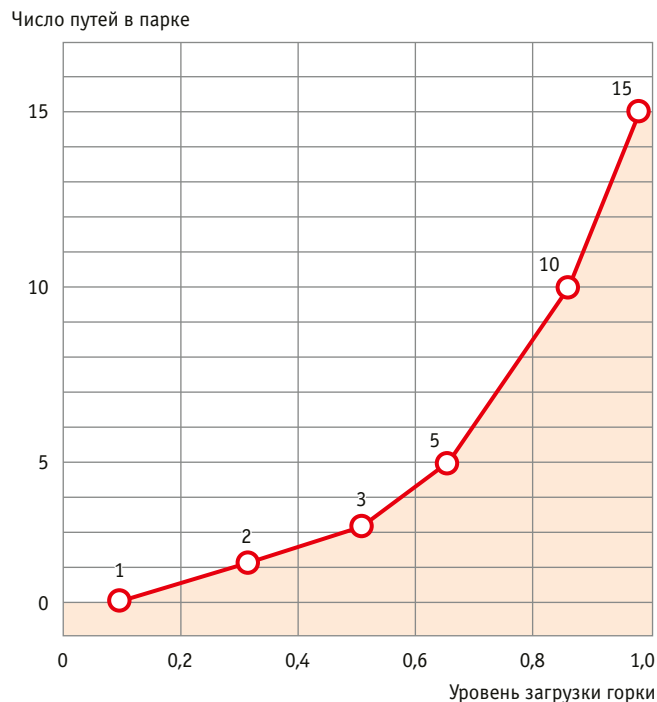


Рис. 3. Зависимость требуемого числа путей в парке от заданной пропускной способности горки

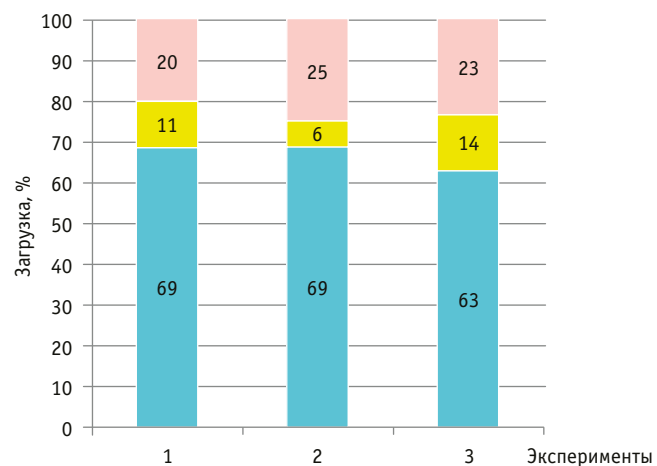


Рис. 4. Полезная загрузка стрелок и потери:

— структурные потери; — технологические потери; — загрузка стрелок с технологическими и структурными потерями

Ошибка 2. Стрелку нельзя загрузить на 100 %. В таком случае возникают структурные и функциональные потери. Функциональные — когда стрелка свободна, но нет готового передвижения, структурные — когда стрелка свободна, но занята следующая за ней (рис. 4, результаты имитационного моделирования [6]).

Ошибка 3. Одна стрелка не может представлять целую горловину. В качестве расчетного может приниматься только структурный элемент, который имеет самостоятельное

функциональное значение. На станции это технологическая операция и как ее вид — законченное передвижение.

Законченное передвижение обеспечивает только группа стрелок — структурный канал. Как видно из рис. 5, ряд передвижений может осуществляться без участия любой наиболее загруженной стрелки.

Структурные каналы лучше, чем одна стрелка, представляют горловину. Казалось бы, чем больше возможных парал-

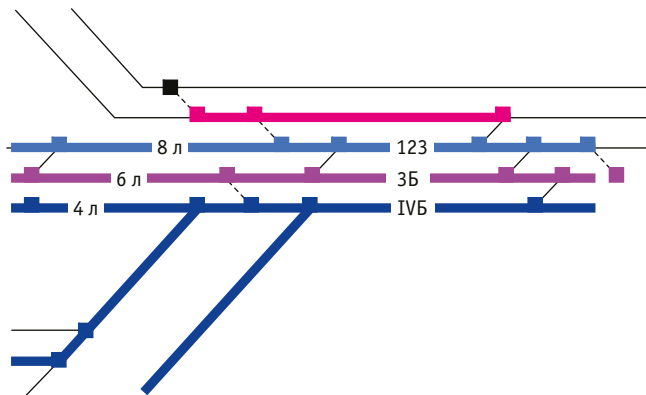


Рис. 5. Структурные каналы в горловине

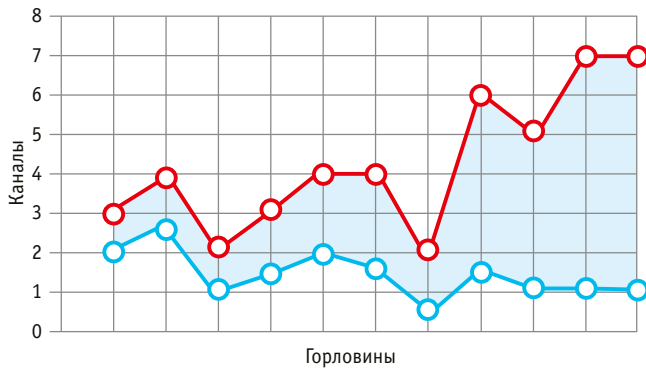


Рис. 6. Структурные и структурно-функциональные каналы в горловинах станции:

— структурные каналы;
— структурно-функциональные каналы

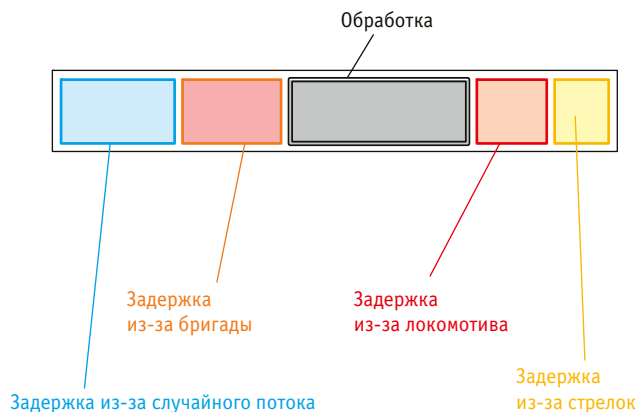


Рис. 7. Схема действительной функциональной роли пути в парке

ельных передвижений в горловине, тем больше ее пропускная способность. Но все не совсем так.

Ошибка 4. Рассматривать структурные свойства горловины в отрыве от функции нельзя. Наложённая функция может существенно менять структурные свойства. Структурные каналы с наложенной функцией назовем структурно-функциональными. Имитационная модель рассчитывает, сколько параллельных передвижений в среднем было в реальности (рис. 6).

Здесь можно увидеть, что реальная пропускная способность горловины может существенно отличаться от потенциальной. Ибо в наложенной технологии может быть меньше или больше секущих (враждебных) передвижений.

Отсюда следует важный вывод — горловину нельзя рассматривать в отрыве от связанного с ней парка, поскольку технология зарождается в парке.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ РОЛИ СТРУКТУРНОГО ОБЪЕКТА В МОДЕЛИ И В ДЕЙСТВИТЕЛЬНОСТИ

Один из критериев корректности метода расчета — требование совпадения функциональной роли структурного объекта в модели и в реальности. Наложённая функция меняет структурные свойства. Поэтому при несовпадении функциональных ролей идет серьезное искажение действительности. К сожалению, такое искажение встречается часто. Рассмотрим это на примере расчета парков.

О пропускной способности парков

Несовпадение 1

В руководстве по проектированию железнодорожных станций и узлов [7] предлагается следующий метод расчета числа путей в парках:

«Пропускная способность станционных устройств определяется числом поездов

$$n = \frac{1440m - \sum T_{\text{пост}}}{t_{\text{зан}}},$$

где m — число параллельно работающих однородных элементов рассчитываемого устройства (например, число путей в парке); $t_{\text{зан}}$ — время занятия пути одним поездом; $\sum T_{\text{пост}}$ — время занятия устройства в течение суток выполнением постоянных операций, мин».

В формуле упоминается только путь. Получается, что он сам обрабатывает состав и сам убирает его. А в действительности обработку выполняет бригада ПТО, и, следовательно, занятость пути может быть обусловлена задержкой из-за бригады. Состав с пути убирает локомотив, и задержка может возникнуть из-за него. Кроме того, есть связь с горловиной (рис. 7) [6].

Функциональные роли парка в модели и в действительности не совпадают.

Несовпадение 2

В соответствии с формулой [7] все пути парка рассматриваются только как каналы. При этом обработка идет на всех

одновременно. Однако функциональная структура парка дру-
гая, там есть еще и функциональный бункер (рис. 8).

Значение технологического бункера рассмотрено выше.

Функциональные роли парка в расчете и в действитель-
ности существенно не совпадают. Метод расчета — полно-
стью ошибочный.

ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВЫ

Активное самоподдержание осуществляется с помощью адап-
тивных процессов. Выше уже упоминалось, что устойчивость
поддерживается в первую очередь адаптивностью и только
во вторую — резервами путей и вагонов на них. Но значит, что
можно сократить фактические резервы без потери устойчи-
вости. Уменьшение фактических резервов за счет управления по-
токами и процессами принято называть динамическими резер-
вами [8]. Они функционально замещают фактические резервы.

Термин «устойчивость транспортной системы» необходи-
мо определить. Для этого введем понятие «нормативное со-
стояние». Это множество фактических состояний транспорт-
ной системы, при которых средняя задержка при выполнении
технологической операции не превышает технологически до-
пустимого уровня.

Устойчивость транспортной системы означает такое ее свой-
ство, когда при заданном уровне случайных внешних воздей-
ствий состояние системы либо не выходит за пределы норма-
тивного, либо возвращается в него за счет адаптации за вре-
мя не выше технологически допустимого.

В зависимости от характера управляемого взаимодействия
динамические резервы можно подразделить на несколько типов.

Динамические резервы первого рода — это резервы при
адаптивном взаимодействии однородных потоков. В ритмах
поступления потоков к потребителям и в ритмах производства,
как правило, имеют место случайные колебания. Для устойчи-
вого транспортного обеспечения производства при необходи-
мости создаются склады или резервы груза в вагонах на резерв-
ных путях. Это в значительной мере снижает эффективность
работы. Если включить в транспортный процесс системных ин-
теграторов, то они смогут организовать адаптивное взаимо-
действие струй потоков [9]. Дело в том, что избыточное при-
бытие груза к одним потребителям с некоторой вероятностью
совпадает с прибытием избыточного к другим потребителям.
Если перенаправить часть избыточных потоков к потреби-
телям, у которых ожидается недостаток, то управление заменит
реальные резервы (рис. 9).

Здесь поток 2 недостаточен для обеспечения ритма потре-
бления. Чтобы не брать груз со склада (или из вагонов — ре-
зерва), часть потока 1 перенаправляется к потоку 2.

Для определения величины динамических резервов перво-
рода естественно определить с достаточной вероятностью
уровень совпадения избыточных и недостаточных потоков.

Схематически динамические резервы первого рода можно
представить в следующем виде:

$$\forall_i |\delta_{\min} | \sum_i q_i^+(t), \sum_i q_i^-(t) | \text{ при } P_{ij} \geq p^*,$$

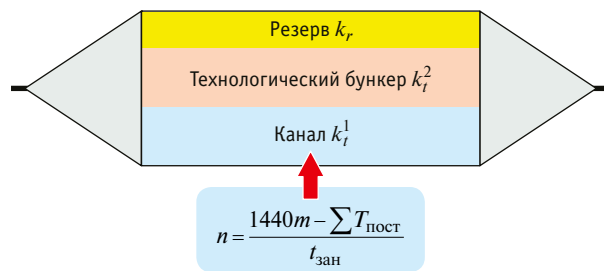


Рис. 8. Функциональная структура парка

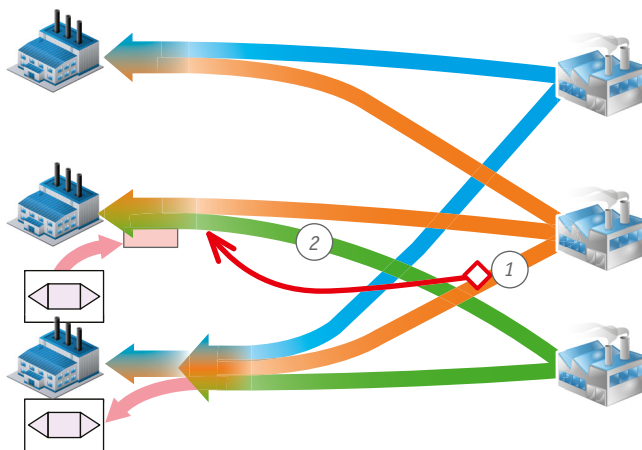


Рис. 9. Замена складов динамическими резервами первого рода

где \forall — знак «для всех»; δ — коэффициент возможной реали-
зации; $q_i^+(t)$ — величина избытка груза; $q_i^-(t)$ — величина не-
достатка груза; P_{ij} — вероятность совпадения избытков и недо-
статков в потоках; p^* — допустимая вероятность совпадения.

Одновременно возникающие избытки и недостатки рас-
сматриваются только в том случае, когда вероятность этого не
ниже допустимой.

Реализация динамических резервов первого рода была про-
верена на имитационных моделях. Построили модели подвода
угля и руды от всех отправителей к трем крупным металлурги-
ческим заводам. Допускалось, что каждый производитель может
отправлять грузы всем потребителям. По каждому случаю
было выполнено два эксперимента. Ниже приведены некото-
рые результаты по одному из них.

Первый эксперимент. Все отправители отправляют каждо-
му получателю составы равномерно. Но из-за разницы в объ-
емах, а значит, несовпадения ритмов прибывают они нерав-
номерно (рис. 10).

Здесь можно увидеть, что отправляемое в сутки число со-
ставов у каждого производителя одинаковое (отрезки разного
цвета), но ритмы разные. Отсюда и неравномерное прибытие.

Второй эксперимент. Организуется согласованный подвод
составов с грузом к каждому потребителю. В данном случае
потребление задано равномерным. Но ритм потребления мож-
ет быть и неравномерным. Расчет делается с применением
динамической транспортной задачи [10]. В этом случае под-
вод к каждому потребителю равномерный (рис. 11).

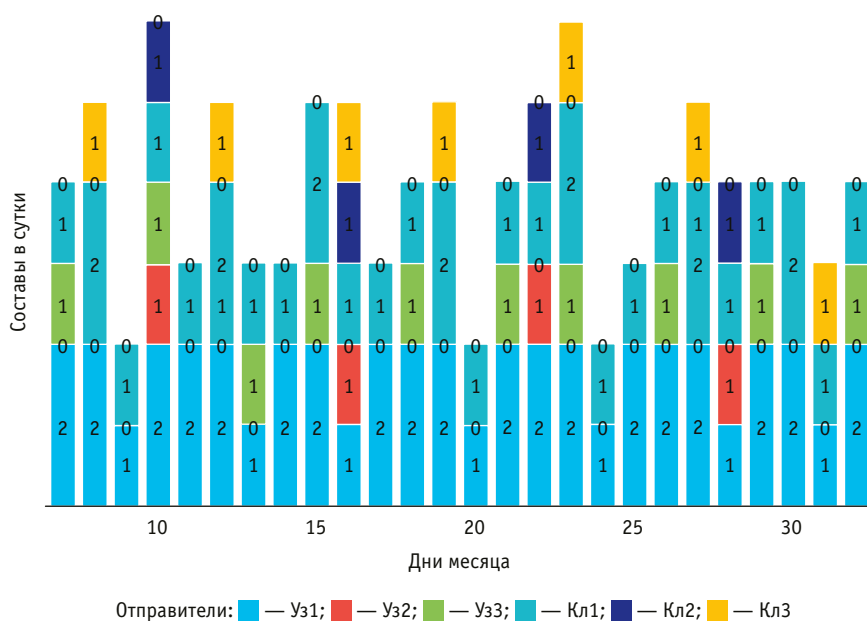


Рис. 10. Неравномерное прибытие при равномерном отправлении

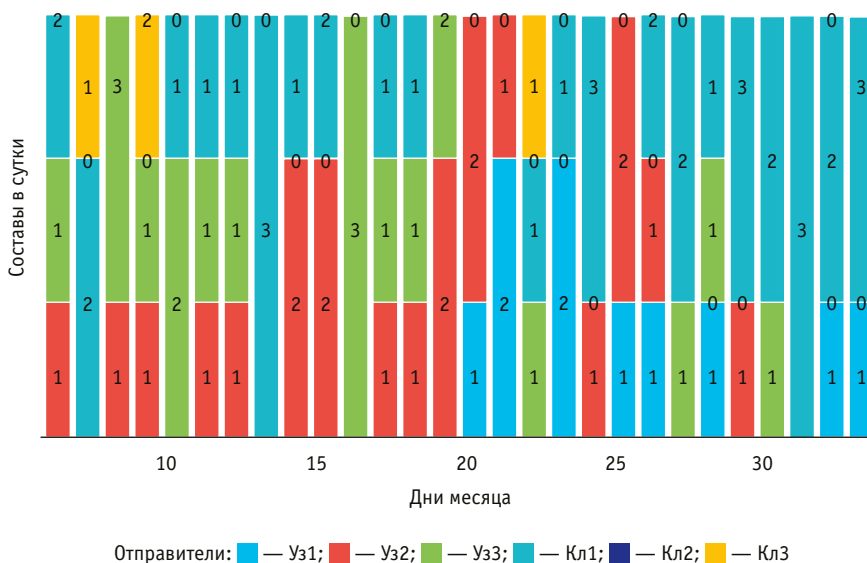


Рис. 11. Согласованное прибытие составов к потребителю

Но теперь меняются ритмы работы отправителей для достижения общей согласованной цели (рис. 12).

Из рис. 12 видно, что отправление от каждого производителя неравномерное (по цвету), но в сумме прибытие равномерное.

Модель может рассчитывать оптимизацию при задании дополнительных условий введением дополнительных ограничений и весовых коэффициен-

тов. Программный комплекс может быть оптимизационным блоком в соответствующей АСУ.

Динамические резервы второго рода появляются при гибком взаимодействии неоднородных струй потоков. Ускорение одних струй за счет замедления других (при сохранении средней скорости пропуска потока) приводит к более согласованному подводу. Также возникает эффект резервов.

Динамические резервы третьего рода появляются при адаптивном взаимодействии потоков и структуры, *динамические резервы четвертого рода* — при согласованной работе отправителя, получателя и транспорта.

О ВЫБОРЕ РАСЧЕТНОГО ЭЛЕМЕНТА И МЕТОДА РАСЧЕТА

Из изложенного материала можно сделать важные выводы.

Первый. Параметры структурного объекта нельзя рассматривать в отрыве от функции. Любой канал (горку, терминал и пр.) нельзя рассматривать в отрыве от функции.

Второй. Любой канал можно рассматривать только вместе с бункером перед ним. Это относится и к горке, грузовому терминалу и пр.

Третий. При взаимодействии выбранного расчетного элемента с другим изменяются параметры обоих. Горловину нельзя рассчитывать в отрыве от парка. Но к парку примыкает и другая горловина. Горку нельзя рассматривать в отрыве от предгорочного парка. Отсюда следует весьма неожиданный вывод.

Четвертый. При определении параметров любого структурного элемента станции минимальным расчетным объектом является только станция в целом.

Какой поток пропустит горловина, парк, горка, терминал при полной загрузке станции — это и будет его максимальная пропускная способность на этой станции при этих параметрах потока. К тому же адаптивность — свойство всей системы, а не отдельных ее частей. Она существенно влияет на параметры структурных элементов.

Всевозможные расчеты структурных элементов по отдельности могут представлять лишь познавательный интерес. Практического значения они не имеют. Поэтому инструкции надо переделывать.

О методе расчета

Расчетная модель должна отображать не только структуру и технологию. Это невозможно ни в одной формуле. Кроме того, необходимо отобразить взаимодействие случайных процессов и управления. На транспорте все потоки и процессы смешанные — частично управляемые, частично случайные. Строгой математи-

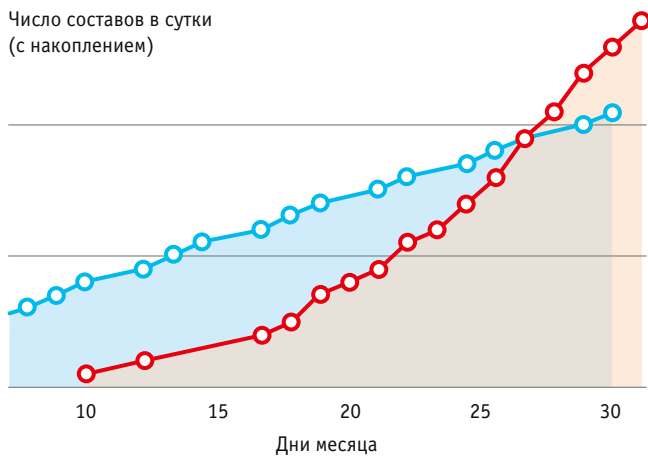


Рис. 12. Равномерное и адаптивное отправление от одного из производителей:

○ — равномерное отправление; ● — адаптивное отправление

ки для этого нет, модели будут либо детерминированные, либо вероятностные. Отобразить взаимодействие случайных процессов и управления можно только в динамике, т.е. в имитационной модели. Диспетчер выбирает последовательность операций. Это — управление. Продолжительность операций колеблется по самым разным причинам. Это — случайный процесс. Новое состояние будет результатом наложения их друг на друга.

Сведения об авторах:

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

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

Николай Васильевич Якушев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения

Литература

1. Козлов П. А. Системные исследования — новый подход // Наука и техника транспорта. 2014. № 1. С. 46–50. ISSN 2074-9325.
2. Козлов П. А. О системах и системности на транспорте // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-3-8.
3. Козлов П. А., Владимирская И. П. Взаимодействие потока и элементов транспортной структуры // Научный вестник МГТУ ГА. 2009. С. 26–34. ISSN 2079-0619.
4. О роли системных интеграторов в транспортном обеспечении экономических связей / П. А. Козлов, И. С. Абдуллаев, Н. А. Тушин, Н. В. Якушев // Транспорт Урала. 2023. № 4 (79). С. 12–16. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-12-16.
5. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог / ОАО «РЖД». Москва : Техинформ, 2011. 289 с.

Отсюда следует важный вывод. Единственным корректным методом расчета станций, узлов и полигонов является только имитационное моделирование [11]. Кстати, практика это доказывает все более убедительно. Все чаще при реконструкции крупных транспортных объектов используется имитационное моделирование.

Здесь следует отметить одно обстоятельство. Часто при разработке так называемых единых технологических процессов станции примыкания и транспорта промышленных предприятий применяется построение суточного плана-графика. И его незаслуженно считают аналогом имитационного моделирования. Это не так: в суточном плане-графике присутствует существенный субъективизм.

Первое. Задается вручную исходное состояние — расположение составов и вагонов по путям и паркам. Опытный технолог знает, что его можно задать удобным для последующей работы и неудобным. *Субъективизм*. Это может существенно отразиться на показателях работы.

Второе. Задается вручную ритм прибытия поездов. Даже если прибытие неравномерно, как доказать, что это грамотное отображение случайных колебаний в прибытии? Да и взаимодействие случайных и управляемых процессов не может проявиться за одни сутки. *Субъективизм*.

Третье. Вручную задается разложение состава по направлениям. *Субъективизм*.

В грамотно построенной имитационной модели и в технологии проведения экспериментов все это реализуется корректно.

Authors information:

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

Oleg V. Osokin, DSc in Engineering, Head of «Analytical and controlling systems on transport traffic accidents algorithm» LLC

Nikolay V. Yakushev, PhD in Engineering, Associate Professor of Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport

References

1. Kozlov P. A. System studies — new approach. *Science and technology in transport*. 2014. No. 1. Pp. 46–50. ISSN 2074-9325. (In Russian).
2. Kozlov P. A. On systems and systemacity of transport. *Transport of the Urals*. 2016. No. 2 (49). Pp. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-3-8. (In Russian).
3. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P. Interaction of the flow and elements of the transport structure. *Civil Aviation High Technologies*. 2009. Pp. 26–34. ISSN 2079-0619. (In Russian).
4. Kozlov P. A., Abdullaev I. S., Tushin N. A., Yakushev N. V. About the role of system integrators in transport economic ties guarantee. *Transport of the Urals*. 2023. No. 4 (79). Pp. 12–16. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-12-16. (In Russian).
5. Instruction on calculation railways capacity. Moscow : Tekhinform, 2011. 289 p. (In Russian).

6. Козлов П. А., Козлова В. П., Осокин О. В., Тушин Н. А. О технологии расчета систем железнодорожного транспорта // Транспорт Урала. 2022. № 3 (74). С. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-3-9.
 7. Проектирование железнодорожных станций и узлов / Э. В. Бакумов, Е. П. Бакумова, К. Г. Гусева [и др.] : справочное и методическое руководство / Под ред. А. М. Козлова, К. Г. Гусевой ; 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1981. 591 с.
 8. Козлов П. А., Владимирская И. П. Оптимизация взаимодействия поставщиков и потребителей при случайном разбросе в потреблении и времени доставки // Вестник РГУПС. 2009. № 2 (34). С. 66–70. ISSN 0201-727X.
 9. Козлов П. А., Тушин Н. А. Системная интеграция в области перевозок // Железнодорожный транспорт. 2010. № 9. С. 68–70. ISSN 0044 4448.
 10. Козлов П. А., Миловидов С. П. Оптимизация структуры транспортных потоков в динамике при приоритете потребителей // Экономика и математические методы. 1982. Т. XVIII. Вып. 3. С. 521–531. ISSN 0424-7388.
 11. Козлов П. А. О методах расчета систем железнодорожного транспорта // Железнодорожный транспорт. 2014. № 12. С. 28–32. ISSN 0044-4448.
6. Kozlov P. A., Kozlova V. P., Osokin O. V., Tushin N. A. On technology for calculation of systems of railway transport. *Transport of the Urals*. 2022. No. 3 (74). Pp. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-3-9. (In Russian).
 7. Bakumov E. V., Bakumova E. P., Guseva K. G. [et al.]. Design of railway stations and junctions. Reference and methodological guide. Ed. by A. M. Kozlov and K. G. Guseva. 2nd edition, revised and expanded. Moscow : Transport, 1981. 591 p. (In Russian).
 8. Kozlov P. A., Vladimirskaya I. P. Optimization of provider-consumer interaction in event of random scatter in consumption and delivery time. *Vestnik RGUPS*. 2009. No. 2 (34). С. 66–70. ISSN 0201-727X. (In Russian).
 9. Kozlov P. A., Tushin N. A. System integration in sphere of transportation. *Railway Transport*. 2010. No. 9. Pp. 68–70. ISSN 0044-4448. (In Russian).
 10. Kozlov P. A., Milovidov S. P. Optimization of transport flows structure in flow dynamics at the priority of consumers. *Economics and Mathematical Methods*. 1982. Vol. XVIII. No. 3. Pp. 521–531. ISSN 0424-7388. (In Russian).
 11. Kozlov P. A. On the methods of railway transport systems calculation. *Railway Transport*. 2014. No. 12. Pp. 28–32. ISSN 0044-4448. (In Russian).

Объем статьи 0,9 авторских листа

Научная статья

УДК 656.078:004.94

Об устойчивости транспортных систем

Петр Алексеевич Козлов¹, Сергей Петрович Вакуленко², Олег Викторович Осокин³, Николай Васильевич Якушев⁴

¹Научно-производственный холдинг «СТРАТЕГ», Москва, Россия

²Российский университет транспорта, Москва, Россия

³ООО «Аналитические и управляющие системы на транспорте «Транспортный алгоритм», Москва, Россия

⁴Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

On the sustainability of transport systems

Petr A. Kozlov¹, Sergey P. Vakulenko², Oleg V. Osokin³, Nikolay V. Yakushev⁴

¹Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia

²Russian University of Transport. Moscow, Russia

³«Analytical and controlling systems on transport traffic accidents algorithm» LLC, Moscow, Russia

⁴Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

В статье на теоретическом уровне рассмотрена проблема устойчивой работы железнодорожных станций и узлов. Предложен оригинальный подход к исследованию устойчивости транспортной системы в общем виде. Приведена формализация материала, необходимая для имитационного исследования устойчивости. Представлены результаты, которые позволяют получить имитационная система ИСТРА.

Ключевые слова: транспорт, система, устойчивость, имитация, адаптация

Abstract

The article suggests a theoretical overview of the problem of a stable operation of railway stations and hubs. An original approach to the research of the stability of transport system in general, has been proposed. The formalization of the material has been presented, which is necessary for the imitative research of the stability. The results, which ISTR simulation system allows to receive, are presented.

Keywords: transport, system, stability, imitation, adaptation

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-11-15

УСТОЙЧИВОСТЬ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ (НА ПРИМЕРЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ)

Железнодорожный транспорт работает с напряжением. «Существенные потери в работе вызывает несоответствие потоков — пропускной и перерабатывающей способности элементов инфраструктуры и вагонных парков — вместимости путевого развита» [1].

В мероприятиях по развитию транспорта часто употребляется тезис «обеспечение устойчивой работы транспортных систем». В теоретических исследованиях это формулируется скорее как «обеспечение устойчивости систем».

Исследование устойчивости таких систем, как железнодорожные станции и узлы, лучше всего проводить на имитационных моделях. Но для этого технологию исследования необходимо представить более формализованно. Этому и посвящена статья.

В литературе часто упоминается «устойчивость по Ляпунову» [2]. По сути, там система считается устойчивой, если отклонения состояния в динамике не превышают заданного предела. Нами же ставится задача исследовать сущность активного противодействия случайным отклонениям в транспортных системах.

Мы исходим из системного подхода, основанного на понятии системы: «система — это целостное образование

с активным самоподдержанием, при этом элементы тоже являются системами» [3].

Активное самоподдержание должны обеспечивать адаптивные механизмы. Содержательно сформулируем, что систему будем считать устойчивой, если есть достаточно развитые адаптивные механизмы, обеспечивающие нормальную ее работу при случайных отклонениях определенного размера.

Выполним необходимую формализацию.

В теории управления является важным положение «управление есть функция состояния». Поэтому к определению понятия «состояние» необходимо относиться серьезно. В данном случае под состоянием будем понимать множество вагонов, расположенных в парке или на путях станции. В первом случае имитационная модель будет укрупненной [4], во втором — более подробной [5].

В первом случае это выглядит примерно так, как показано на рис. 1.

Иногда для моделирования достаточно укрупненного подхода, скажем, это вагоны с однородным грузом, ожидающим выгрузки. Но может понадобиться расположение на путях, если составы отличаются по назначению (рис. 2).

Введем обозначения.

Пусть x_i^f — вагон на пути f . Тогда X — это упорядоченное множество вагонов, расположенных на путях f .

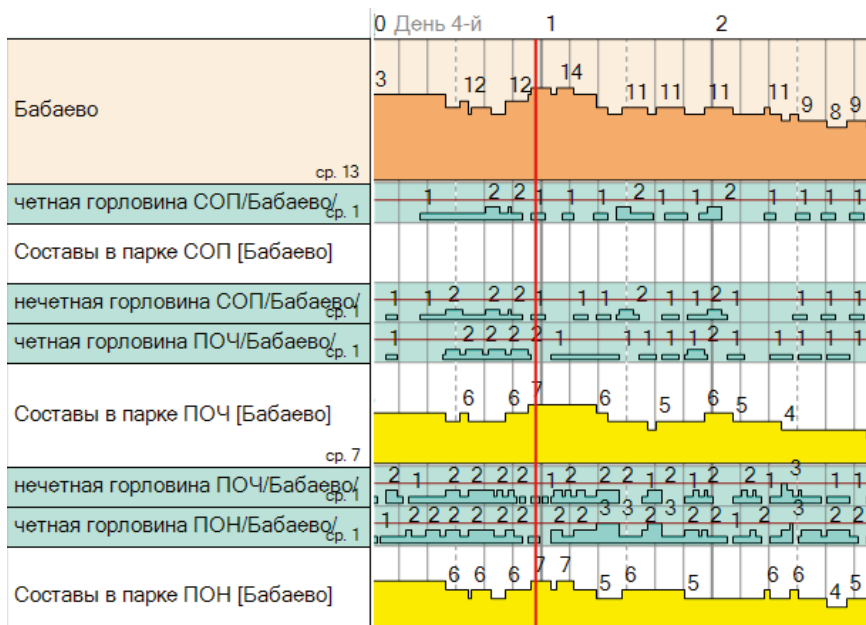


Рис. 1. Расположение вагонов в парках

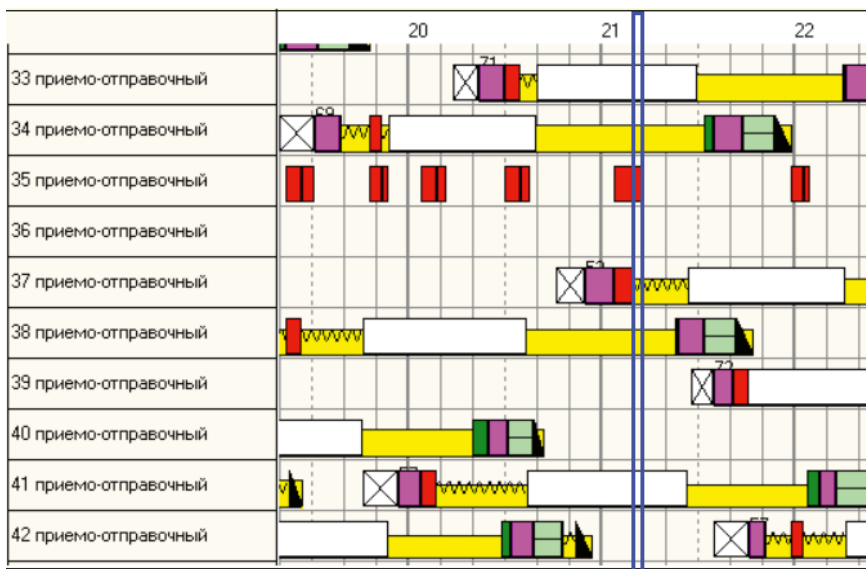


Рис. 2. Расположение составов на путях парка

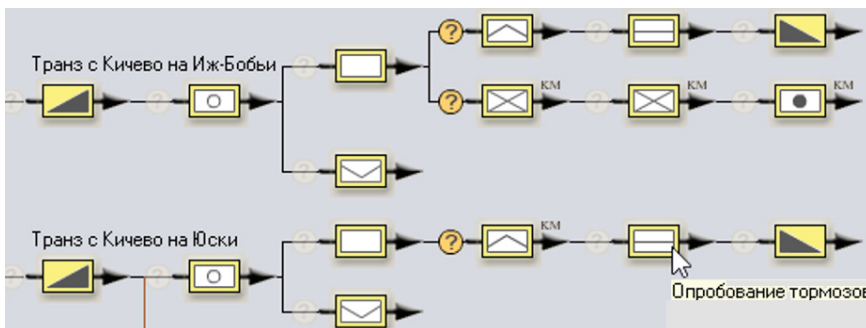


Рис. 3. Схема технологического процесса станции (отрывок)

Пусть $x_i^f(t)$ — i -й вагон, стоящий на пути f в момент времени t . Тогда $X(t) = \langle x_i^f(t) \rangle$ — это упорядоченное множество вагонов на путях f в момент t . Здесь $\langle \rangle$ — знак упорядоченного множества.

Упорядоченное множество означает, что вагоны расположены в соответствии с технологией. Вагоны в прибывшем составе могут располагаться только в парке приема, а, скажем, в сортировочном не могут.

Локомотивы и бригады ПТО не включены в понятие «состояние». Они не связаны жестко к структурным элементам, могут перебрасываться из парка в парк. Поэтому они считаются элементами обеспечения технологических операций.

Под технологическим процессом понимается упорядоченная последовательность технологических операций (рис. 3).

Пусть y_j^f — это операция технологического процесса с вагонами на пути f . Тогда $Y = \langle y_j^f \rangle$ — это упорядоченное множество операций технологического процесса, выполняемых с вагонами на путях f . Соответственно $Y(t) = \langle y_j^f(t) \rangle$ — это же множество в момент t .

Обозначим наложение технологии на состояние $\langle x_i^f \rangle \cup \langle y_j^f \rangle$ как технологический процесс.

Тогда $\langle x_i^f(t) \rangle \cup \langle y_j^f(t) \rangle$ — это технологический процесс во времени.

Относительно состояния возникает вопрос: что такое «хорошее» и «плохое» состояние? Какой критерий? Здесь предлагается следующий подход: если это множество вагонов с расположением, обеспечивающим технологический процесс с допустимыми задержками, то состояние «хорошее», а если нет — «плохое».

Поэтому множество X разделим на два подмножества:

$$X = X^+ \cup X^-,$$

где X^+ — это множество вагонов с расположением, при котором с наложением нормативного технологического процесса обеспечивается заданный уровень задержек.

$$\forall_t \langle x_i^{f+}(t) \rangle \cup \langle y_j^f(t) \rangle \Rightarrow (\Delta\tau_{cp}(t) < \Delta\tau^\diamond),$$

где $\Delta\tau_{cp}(t)$ — средняя задержка в момент времени t ; $\Delta\tau^\diamond$ — функционально допустимая задержка.

В этом случае $x_i^{f+} \in X^+$ — нормативное состояние.

Нормативный процесс — это движение системы от одного нормативного состояния к другому.

Рассчитывать задержки в данный момент времени можно следующим способом. В имитационной модели после выполнения операции в очередь заносится операция-продолжение. И последняя будет находиться там до тех пор, пока не появятся условия для ее выполнения (рис. 4).

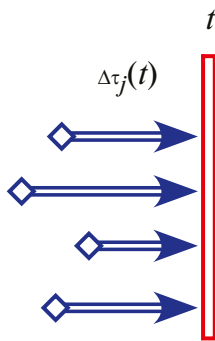


Рис. 4. Схематическое представление очереди операций со временем нахождения в ней

Подсчитать среднее время ожидания операций в очереди нетрудно:

$$\Delta\tau_{cp} = \frac{\sum_t \Delta\tau_j(t)}{n(t)}$$

— средняя задержка при выполнении операции,

где $n(t)$ — число выполняемых операций в момент t .

Имитационная модель в системе ИСТРА может выдавать этот параметр (рис. 5).

время	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30
средняя задержка (мин)	14.2	38.1	35.6	64.4	41
суммарная задержка (ч)	6.9	21.5	21.2	38.2	33.2
кол-во операций	29	33.8	35.6	35.6	48.6

Рис. 5. Задержки в выделенный момент времени

Второе подмножество X^- — это множество вагонов с расположением, при котором вышеуказанное требование не выполняется: $\Delta\tau_{cp} \geq \Delta\tau^\diamond$.

Перевод $X^+ \Rightarrow X^-$ осуществляют случайные возмущения $\{\omega_r\}$, во времени будет $\{\omega_r(t)\}$, где $\{\}$ — неупорядоченное множество.

Адаптивное действие направлено на преобразование множества X^- в X^+ , т.е. $X^- \Rightarrow X^+$.

Адаптивное действие включает набор корректирующих операций $\langle y_k^* \rangle$.

Адаптация будет представлять собой наложение корректирующих операций на состояние $\langle x_i^f \rangle \cup \langle y_k^* \rangle$ во времени — $\langle x_i^f(t) \rangle \cup \langle y_k^*(t) \rangle$.

Устойчивой по отношению к заданному набору возмущений будем считать систему в том случае, если на любое возмущение есть адаптивная реакция, возвращающая систему в нормативное состояние (рис. 6).

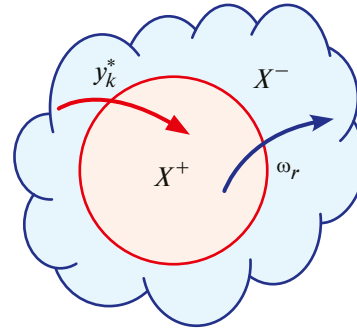


Рис. 6. Схема взаимодействия возмущений и адаптивных реакций

Условие устойчивости означает, что адаптивная реакция нейтрализует любое возмущение из некоторого множества

$$\forall \langle x_i^f \rangle \forall \{\omega_r(t)\} \exists \langle y_k^*(t) \rangle \Rightarrow \langle y_k^*(t) \rangle \geq \{\omega_r(t)\}.$$

Действие возмущения $\{\omega_r(t)\}$ может означать, по сути, перевод некоторого элемента $x_i^f(t)$ из множества X^+ в множество X^- , а адаптивная реакция осуществляет обратное действие.

Тогда, если для каждого возмущения $\{\omega_r(t)\}$, вызывающего действие $x_i^{f+} \in X^+ \Rightarrow x_i^{f-} \in X^-$, существует адаптивная реакция $\langle y_k^*(t) \rangle$, осуществляющая обратное действие $x_i^{f-} \in X^- \Rightarrow x_i^{f+} \in X^+$, то это и означает сущность записи $\langle y_k^*(t) \rangle \geq \{\omega_r(t)\}$.

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Оно может происходить двумя способами:

- за счет резервов инфраструктуры и транспортных средств;
- за счет повышения адаптации, т.е. гибкой технологии.

Второй способ значительно эффективнее. Отрабатывать технологические решения при возникновении трудностей лучше всего на имитационной модели.

Необходимо воспроизводить в модели возможные неблагоприятные ситуации (возмущения) и отрабатывать технологические решения, наиболее подходящие для них (корректирующие операции).

- Перечислим некоторые неблагоприятные ситуации: возникает всплеск потока;
- выходит из строя локомотив;
- не переводится стрелка;
- происходит сход на стрелке или на пути и др.

Литература

1. Сайбаталов Р. Ф. Методы устранения затруднений в работе полигонов железнодорожной сети : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2021.
2. Ляпунов А. М. Общая задача об устойчивости движения. Москва – Ленинград, 1950. 472 с.
3. Козлов П. А. Системные исследования — новый подход // Наука и техника транспорта. 2014. № 1. С. 46–50. ISSN 2074-9325.
4. Козлов П. А., Колокольников В. С. Макроструктурный подход в исследовании железнодорожных станций // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-3-7.
5. Козлов П. А., Колокольников В. С., Тушин Н. А. О технологии расчета железнодорожных станций // Железнодорожный транспорт. 2017. № 6. С. 42–46. ISSN 0044-4448.
6. Козлов П. А., Тушин Н. А. Имитационная экспертиза проектов развития инфраструктуры // Мир транспорта. 2011. № 2. С. 22–25. ISSN 1992-3252.

Объем статьи 0,43 авторских листа

References

1. Saybatalov R. F. Methods of eliminating difficulties in the operation of polygons of the railway network : Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2021. (In Russian).
2. Lyapunov A. M. The general problem of traffic stability. Moscow – Leningrad, 1950. 472 p. (In Russian).
3. Kozlov P. A. System studies — new approach. *Science and technology in transport*. 2014. No. 1. Pp. 46–50. ISSN 2074-9325. (In Russian).
4. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S. Macrostructural approach in research of railway stations. *Transport of the Urals*. 2017. No. 2 (53). Pp. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-3-7. (In Russian).
5. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Tushin N. A. On the technology of calculating of railway stations. *Railway Transport*. 2017. No. 6. Pp. 42–46. ISSN 0044-4448. (In Russian).
6. Kozlov P. A., Tushin N. A. Simulation expertise of infrastructure development projects. *World of Transport and Transportation*. 2011. No. 2. Pp. 22–25. ISSN 1992-3252. (In Russian).

Научная статья

УДК 629.4.027:539.37

Прогнозирование скольжения в прессовом соединении колесной пары вагона

 Сергей Викторович Кротов¹, Дмитрий Павлович Кононов², Александр Петрович Буйносов³
¹Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

³Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

Prediction of sliding in the press connecting the wheelset of the car

 Sergey V. Krotov¹, Dmitriy P. Kononov², Alexander P. Buynosov³
¹Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

³Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

В статье представлена модель множественной линейной регрессии для прогнозирования зон скольжения прессового соединения, достигающих значительных величин при высоких нагрузках. Зоны скольжения как функция отклика в множественной регрессии определены по результатам расчета модели колесной пары методом конечных элементов. При этом численный эксперимент включал все сочетания параметров нагружения. Оценены составляющие предлагаемой модели регрессии: критерии включения и исключения переменных, коэффициенты корреляции, детерминации, статистики взаимосвязей параметров регрессии. Полученная модель позволяет с достаточной точностью прогнозировать появление зон проскальзывания ступицы колеса на оси и может использоваться при оптимизации конструкции колесной пары и выбора оптимальных параметров прессового соединения.

Ключевые слова: прессовое соединение, площадь скольжения, функция отклика, осевая нагрузка, модель множественной регрессии, уравнение регрессии

Abstract

The article presents the model of a linear regression for predicting the sliding zones of pressed connections reaching significant values under high loads. Sliding zones as the response function in multiple regression have been determined on the results of calculation of a wheel-set with the method of finite-elements. Meantime, the numerical experiment contained all the combinations of the parameters of loadings. The components of the proposed regression models have been evaluated: the criteria of inclusion and exclusion of variables, coefficients of correlation, determination, statistics of correlations of the regression parameters. The received model allows to predict with sufficient accuracy the appearance of the zones of sliding of a wheel hub on an axle and can be used when optimizing the wheel-set construction and the choice of the optimal parameters of pressed connections.

Keywords: pressed connection, sliding area, response function, axle loading, multiple regression model, regression equation

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-16-21

Повышение качества измерительной и вычислительной техники, применяемой на железнодорожном транспорте, приводит к значительному росту получаемых эмпирических данных. При этом усложняются представления о соотношении между эмпирическими показателями и извлекаемой из них информацией.

Эмпирические данные, полученные в результате численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ), представляют собой набор числовых значений, описывающих поведение исследуемой системы. Эти данные включают в себя значения напряжений, деформаций, перемещений, температур и других физических величин во всех точках модели колесной пары [1].

Исследуемый параметр несущей способности соединения — величина зон отсутствия неподвижного контакта — является следствием воздействия внешних эксплуатационных нагрузок, влияния физико-механических свойств элементов колесной пары. Косвенными параметрами могут считаться контактное давление в соединении и класс обработки контактируемых поверхностей.

Некоторые эмпирические данные не дают прямой информации о самых важных внутренних особенностях или характеристиках исследуемого явления [2]. В частности, при непрерывно изогнутой оси в соединении «колесо — ось» присутствуют области как неподвижного, так и подвижного контакта, влияющие на надежность соединения колеса и оси. Области взаимного проскальзывания вызывают коррозию трения при постоянно меняющихся зонах растяжения и сжатия волокон поверхностей в соединении, это приводит к микроизнашиванию, электроэрозионным явлениям, химическому окислению, в результате чего снижается усталостная прочность оси и появляются трещины (изломы), а при значительных нагрузках происходит нарушение соединения.

Зоны скольжения по отношению к общей площади сцепления являются расчетными, а не измеряемыми величинами. Апостериорную оценку состояния прессового соединения можно получить лишь после расформирования колесной пары либо при помощи специального оборудования.

Использование множественной регрессии позволит выяснить влияние внешних воздействий, свойств контактирующих тел на величину зон сцепления и скольжения, которые в конечном счете определяют прочность соединения.

В численном эксперименте при расчетах по МКЭ колесной пары используются независимые параметры, не коррелируемые друг с другом, в этом случае отсутствует понятие мультиколлинеарности [2, 3].

Регрессия по таким параметрам считается лучшим методом для создания прогнозов по значениям вновь получаемых данных на основании анализа совокупности независимых параметров и результатов расчета исследуемой величины [2, 3]. Математическая связь между предиктором и независимыми параметрами записывается так:

$$y = f(x_1, \dots, x_p; \beta_1, \dots, \beta_m) + e,$$

где β_1, \dots, β_m — получаемые новые параметры; e — остаток (ошибка) между рассчитанным и прогнозируемым значением y .

Так, если $m = p + 1$ и $f(x_1, \dots, x_p; \beta_1, \dots, \beta_m) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p$ то множественная линейная регрессия в общем случае имеет вид

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_p x_p.$$

Значения внешних воздействий x_1, \dots, x_p используются на заданных уровнях при $n = 96$ вариаций их сочетаний при расчетах колесной пары по МКЭ, что позволило полностью определить напряженно-деформированное состояние колесной пары вагона [4–6]. Из множества полученных параметров величина площади зон скольжения принята как функция отклика, определяющая целостность прессового соединения [4–7]. В свою очередь, площадь сцепления и скольжения зависят также и от качества сопрягаемых поверхностей, контактного давления, развития коррозии трения в процессе эксплуатации и т. п.

Расчеты повторяются при всех возможных сочетаниях варьируемых переменных X_1, \dots, X_p [2, 3] (табл. 1).

Варьируемые независимые переменные авторами трактуются следующим об-

Таблица 1

Уровни варьируемых параметров и условные обозначения

Уровень вертикальной нагрузки, кН	216	245	VERT (x_1)	
Уровень поперечной нагрузки, кН	60	120	POPER (x_2)	
Уровень кручения, кНм	0	17	MOKR (x_3)	
Уровень торможения, кВт	0	39,4	151,5	TORM (x_4)
Эксцентриситет, см	2,8	7	EXCENT (x_5)	
Толщина обода, см	7	2,2	TOLOBOD (x_6)	

Таблица 2

Основные показатели множественной линейной регрессии

Итоги регрессии для зависимой переменной: ZSKOL (planFac32 макс.sta) R= .67361653 R2= 45375923 Скоррект. R2= .41693401 F(6,89)=12.322 p<.00000 Станд. ошибка оценки: .10943						
N = 96	b^*	Станд. Ошиб. b^*	b	Станд. Ошиб. b	t (89)	p-знач
Св. член			0.034045	0.184444	0.18458	0.853978
VERT	0.110646	0.078342	0.001088	0.000770	1.41234	0.161337
POPER	0.466485	0.078342	0.002217	0.000372	5.95444	0.000000
MOKR	-0.075691	0.078342	-0.000013	0.000013	-0.96615	0.336586
TORM	-0.156182	0.078342	-0.000347	0.000174	-1.99359	0.049259
EXCENT	-0.410106	0.078342	-0.024879	0.004753	-5.23479	0.000001
TOLOBOD	-0.159996	0.078342	-0.009124	0.004467	-2.04227	0.044084

Таблица 3

Дисперсионный анализ функции отклика ZSKOL

Эффект	Дисперсионный анализ; Завис. Перем. ZSKOL				
	Сумма квадр.	df	Средн. квадр.	F	p-знач.
Регресс.	0.88533	6	0.14755	12.32197	0.00000
Остатки	1.06577	89	0.01197		
Итого	1.95110				

разом: VERT — осевая нагрузка, POPER — реакция взаимодействия обода колеса и головки рельса при движении в кривой, TORM — изменение температуры (тепловой поток) при различных режимах торможения, EXCENT — эксцентриситет приложения нагрузки к центру поперечного сечения прессового соединения колеса и оси, MOKR — крутящий момент, TOLOBOD — толщина обода. Все параметры вводятся на двух уровнях, температурное воздействие представлено тремя режимами торможения [4]:

первый режим — нет торможения (тепловой поток равен нулю);

второй режим — экстренное торможение вагона, время торможения 48 с. В этом случае тепловой поток, подводимый к поверхности колеса, равен 151,5 кВт;

третий режим — длительное торможение с временем действия 1200 с. Это соответствует тепловому потоку 39,4 кВт.

Функция отклика в уравнении регрессии обозначена ZSKOL, выражена в % общей площади контакта колеса и оси [5, 6] (табл. 2).

Для уточнения параметров регрессии выполнен дисперсионный анализ (табл. 3).

Таким образом, гипотезу о том, что данная переменная не улучшает предсказание $H_0: \beta_1 = \dots = \beta_p = 0$ с вероятностью $P < 10^{-3}$, можно отбросить. Статистикой критерия при альтернативной гипотезе $H_1: \beta_k \neq 0$ является

$$F = \frac{b_k^2}{[se(b_k)]^2}.$$

Эта статистика для гипотезы H_0 будет иметь F -распределение с 1-й и $\nu_R = n - p - 1$ -й степенями свободы и является статистикой F -включения. Ниже представлены статистики F для каждого коэффициента b_k . Эквивалентная ей статистика

$$t = \frac{b_k}{se(b_k)}$$

имеет распределение Стьюдента с $\nu_R = n - p - 1$ -й степенями свободы для H_0 [2]. Величина статистики $|t|$ позволяет судить об относительной важности независимых переменных. Значения F , df и результирующее значение p используются в качестве общего F -критерия взаимосвязи между зависимой переменной ZSKOL и набором независимых переменных.

Стандартная ошибка оценки se служит мерой рассеяния полученных значений относительно прямой линии регрессии, b — коэффициенты при переменной, или свободный член уравнения, p — уровень вероятности [2, 3]. Результаты расчета регрессии переменной «зона скольжения» на остальные варьируемые параметры нагружения и геометрические параметры приведены в табл. 2, где R представляет собой коэффициент множественной корреляции, R^2 — доля вариации функции отклика, объясняемой переменными. Коэффициент множественной детерминации измеряет уменьшение общего изменения зависимой переменной за счет (нескольких) независимых переменных. Параметр *Adjusted R2* — скорректированный коэффициент детерминации $AR2 = 1 - (1 - R^2) \left(\frac{n}{n-p} \right) = 1 - (1 - 0,454) \left(\frac{96}{96-7} \right) \approx 0,42$, где $n = 96$ — число вариантов расчета, $p = 7$ — число независимых переменных, задействованных в расчете, равное 6 и 1 с учетом свободного члена уравнения регрессии. Скорректированный коэффициент детерминации интерпретируется аналогично значению R^2 , за ис-

ключением того что скорректированный R^2 учитывает количество степеней свободы. Он корректируется путем деления суммы квадратов ошибок и общей суммы квадратов на их соответствующие степени свободы [5, 6].

Это означает, что цель множественной регрессии — определение полезности факторов влияния (материала, геометрических и физических параметров, нагрузок) для прогнозирования величины зон скольжения в соединении [7, 8].

Оценка уравнения множественной регрессии по результатам расчета имеет следующий вид:

$$Y = 0,034 + 0,111x_1 + 0,467x_2 - 0,076x_3 - 0,166x_4 - 0,410x_5 - 0,1599x_6.$$

Поскольку $R^2 = 0,454$, то 45 % вариации объясняется данной регрессией Y по X_1, \dots, X_6 при высоком коэффициенте множественной корреляции $R = 0,67$.

$$\text{Критерий Фишера } F = \frac{R^2(n-p-1)}{(1-R^2)p} = \frac{0,454(96-6-1)}{(1-0,454) \cdot 6} =$$

$= 12,32$ выше табличного $F(6,89) = 4,2$ [2], поэтому функция отклика с вероятностью, большей чем 99 %, линейно зависит от одного из варьируемых параметров численного эксперимента, полученная модель статистически значима при < 1 %-м уровне значимости [5–7]. Вероятность ошибки при получении каких-либо закономерностей мала, и уравнение регрессии может быть использовано для прогнозирования зон скольжения в прессовом соединении.

Допуск переменной определяется как $1 - R^2$ для каждой переменной со всеми другими независимыми переменными в уравнении регрессии. Следовательно, чем меньше допуск переменной, тем более избыточным является ее вклад в регрессию (т.е. она избыточна по отношению к вкладу других независимых переменных) [2, 3].

В табл. 4 приведены параметры допуска переменных в уравнение регрессии.

Очевидно, что переменные VERT и MOKR имеют невысокие показатели допуска. Но, например, вертикальная нагрузка постоянна. Поэтому на данном этапе решено оставить переменные в уравнении. В частности, при проведении прогнозирования любая переменная может быть исключена.

Таблица 4

Переменные, включенные в уравнение регрессии

Переменная	Переменные, входящие в уравнение (planFac32 макс.sta)						
	b^*	Частная Корр.	Получаст. Корр.	Толеран.	R -квадр.	$t(89)$	p -знач.
VERT	0.110646	0.148058	0.110646	1.000000	0.00	1.41234	0.161337
POPER	0.466485	0.533745	0.466485	1.000000	0.00	5.95444	0.000000
MOKR	-0.075691	-0.101879	-0.075691	1.000000	0.00	-0.96615	0.336586
TORM	-0.156182	-0.206754	-0.156182	1.000000	0.00	-1.99359	0.049259
EXCENT	-0.410106	-0.485196	-0.410106	1.000000	0.00	-5.23479	0.000001
TOLOBOD	-0.159996	-0.211579	-0.159996	1.000000	0.00	-2.04227	0.044084

Здесь полупараметрическая корреляция аналогична статистике частичной корреляции. Как и частичная корреляция, это показатель корреляции между двумя переменными, который остается после учета (т.е. «частичного устранения») эффектов одной или нескольких других переменных-предикторов.

Однако в то время как квадрат частичной корреляции между предиктором X_1 и переменной ответа Y может быть интерпретирован как доля (уникальной) дисперсии, учитываемой X_1 , при наличии других предикторов X_2, \dots, X_k относительно остаточной или необъяснимой дисперсии, которая не может быть учтена X_2, \dots, X_k , квадратичная полупараметрическая или частичная корреляция представляет собой долю (уникальной) дисперсии, учитываемой предиктором X_1 относительно общей дисперсии Y . Таким образом, полупараметрическая, или частичная, корреляция является лучшим показателем «практической значимости» предиктора, поскольку она масштабируется до общей изменчивости зависимой переменной (ответа).

Таблица 5

Площадь скольжения при современной нагрузке на ось 250 кН/ось и неизношенном ободе

Переменная	Предск. значения для перемен.: ZSKOL		
	<i>b</i> -Вес	Значение	<i>b</i> -Вес * знач.
VERT	0.001088	250.0000	0.271965
POPER	0.002217	60.0000	0.133006
МОКР	-0.000013	0.0000	0.000000
TORM	-0.000347	39.4000	-0.013670
EXCENT	-0.024879	2.8000	-0.069661
ТОЛОВОД	-0.009124	7.0000	-0.063866
Св. член			0.034045
Предсказанные			0.291818
-95.0%ИС			0.233309
+95.0%ИС			0.350328

Таблица 7

Площадь скольжения при перспективной нагрузке 290 кН/ось и неизношенном ободе

Переменная	Предск. значения для перемен.: ZSKOL		
	<i>b</i> -Вес	Значение	<i>b</i> -Вес * знач.
VERT	0.001088	290.0000	0.315479
POPER	0.002217	60.0000	0.133006
МОКР	-0.000013	0.0000	0.000000
TORM	-0.000347	0.0000	0.000000
EXCENT	-0.024879	2.8000	-0.069661
ТОЛОВОД	-0.009124	7.0000	-0.063866
Св. член			0.034045
Предсказанные			0.349003
-95.0%ИС			0.242987
+95.0%ИС			0.455019

Еще две характеристики — $t(df)$ и p -значение — используются для проверки гипотезы о том, что свободный член равен 0 [2, 3]. Свободный член b в уравнении показывает прогнозируемое значение зависимой переменной (Y), когда все независимые переменные (X) равны нулю. Он является точкой пересечения линии регрессии с осью Y и служит важным показателем в анализе регрессионной модели, так как позволяет оценить величину и направление связи между зависимой и независимыми переменными. Если он положителен, это означает, что при нулевых значениях независимых переменных прогнозируемое значение зависимой переменной также будет равно нулю, а если он отрицателен, то при нулевых значениях независимых переменных прогнозируется отрицательное значение ZSKOL.

Применяя этот метод моделирования, оценим динамику скольжения в различных условиях нагружения, учитывая тенденцию увеличения вертикальной осевой нагрузки. В табл. 5–10 приведены числа, представляющие собой

Таблица 6

Площадь скольжения при современной нагрузке на ось 250 кН/ось и изношенном ободе

Переменная	Предск. значения для перемен.: ZSKOL		
	<i>b</i> -Вес	Значение	<i>b</i> -Вес * знач.
VERT	0.001088	250.0000	0.271965
POPER	0.002217	60.0000	0.133006
МОКР	-0.000013	0.0000	0.000000
TORM	-0.000347	39.4000	-0.013670
EXCENT	-0.024879	2.8000	-0.069661
ТОЛОВОД	-0.009124	2.2000	-0.020072
Св. член			0.034045
Предсказанные			0.335612
-95.0%ИС			0.277753
+95.0%ИС			0.393472

Таблица 8

Площадь скольжения при перспективной нагрузке 290 кН/ось и изношенном ободе

Переменная	Предск. значения для перемен.: ZSKOL		
	<i>b</i> -Вес	Значение	<i>b</i> -Вес * знач.
VERT	0.001088	290.0000	0.315479
POPER	0.002217	60.0000	0.133006
МОКР	-0.000013	0.0000	0.000000
TORM	-0.000347	0.0000	0.000000
EXCENT	-0.024879	2.8000	-0.069661
ТОЛОВОД	-0.009124	2.2000	-0.020072
Св. член			0.034045
Предсказанные			0.392797
-95.0%ИС			0.287139
+95.0%ИС			0.498455

Таблица 9

Таблица 10

Площадь скольжения при экстремальной нагрузке 320 кН/ось

Переменная	Предск. значения для перемен.: ZSKOL		
	<i>b</i> -Вес	Значение	<i>b</i> -Вес * знач.
VERT	0.001088	320.0000	0.348115
POPER	0.002217	60.0000	0.133006
MOKR	-0.000013	0.0000	0.000000
TORM	-0.000347	0.0000	0.000000
EXCENT	-0.024879	2.8000	-0.069661
TOLOBOD	-0.009124	2.2000	-0.020072
Св. член			0.034045
Предсказанные			0.425433
-95.0%ИС			0.278348
+95.0%ИС			0.0572518

Площадь скольжения при экстремальной нагрузке 300 кН/ось

Переменная	Предск. значения для перемен.: ZSKOL		
	<i>b</i> -Вес	Значение	<i>b</i> -Вес * знач.
VERT	0.001088	300.0000	0.326358
POPER	0.002217	110.0000	0.243845
MOKR	-0.000013	0.0000	0.000000
TORM	-0.000347	0.0000	0.000000
EXCENT	-0.024879	2.8000	-0.069661
TOLOBOD	-0.009124	2.2000	-0.020072
Св. член			0.034045
Предсказанные			0.514514
-95.0%ИС			0.396566
+95.0%ИС			0.632462

взвешенные коэффициенты *b*; значения переменных; произведения этих чисел на значения переменных, константа и результат прогнозирования — взаимное скольжение поверхностей контакта колеса и оси, которое выражено в процентах всей площади контакта в прессовой посадке [9, 10]. Получены доверительные интервалы, невысокий разброс говорит о точности прогноза [2, 3].

Выполнено прогнозирование величины зон скольжения при современной осевой нагрузке в 250 кН/ось, горизонтальной нагрузке 60 кН, служебном торможении при скорости 60 км/ч в течение 2 мин, что соответствует тепловыделению 177 кВт/м² (тепловой поток 39,44 кВт), а также при смещении реакции рельса по отношению к центру поперечного сечения прессового соединения — эксцентриситете 2,8 см, толщине обода изношенного колеса 70 мм (табл. 5).

Площадь зон скольжения составила 29,2 %. При изношенном ободе и тех же параметрах нагружения величина зон скольжения увеличена до 33,6 % (табл. 6).

В условиях отсутствия торможения и деформации кручения при перспективной нагрузке 290 кН/ось величина зон скольжения изношенного колеса еще выше — 34,9 % (табл. 7), а изношенного — 39,3 % (табл. 8).

Экстремальные нагрузки приведены в табл. 9 и 10. Так, при нагрузке 320 кН/ось величина зон скольжения выросла до 42,5 % (см. табл. 9), т.е. «всего» на 3,2 % по сравнению с предыдущим значением вертикальной нагрузки 290 кН/ось

(см. табл. 8). Очевидно, что это внушительные величины, несмотря на то что в прессовом соединении присутствуют зоны как прямого, так и обратного скольжения.

В табл. 10 нагрузка на ось уменьшена до 300 кН/ось, однако горизонтальная реакция рельса равна 110 кН, что приводит к значительному росту площади взаимного проскальзывания в прессовом соединении до 52,5 %. Эти прогнозы вполне согласуются с расчетами колесной пары, выполненными в [4–9] и показавшими, что более чем в 10 % случаев площадь скольжения превышала 50 % площади соединения, а в двух случаях достигла величин более 60 %.

Учитывая пределы точности полученного уравнения регрессии, можно утверждать, что для современных осевых нагрузок величина площади скольжения относительно безопасна. Однако с ростом осевой нагрузки более 300 кН взаимное проскальзывание колеса и оси увеличивается, очевидно негативное влияние горизонтальной реакции рельса в контакте с гребнем колеса [11–13]. Важно учесть, что в эксплуатации динамические нагрузки могут быть и выше, что подтверждает исследование [14], и это, безусловно, увеличивает скольжение в соединении колеса и оси.

Таким образом, опираясь на полученные результаты как на набор данных для сравнения, с использованием автоматизированных систем контроля можно выявлять неблагоприятные комбинации нагружающих факторов для прессового соединения колеса и оси вагона в условиях эксплуатации.

Сведения об авторах:

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

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

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

Authors information:

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

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

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

Литература

1. Браверман Э. М., Мучник И. Б. Структурные методы обработки данных. Москва : Наука, 1983. 464 с.
2. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ. Москва : Мир, 1982. 488 с.
3. Боровиков В. П. Популярное введение в программу STATISTICA. Москва : КомпьютерПресс, 1998. 267 с.
4. Кротов С. В., Кононов Д. П., Буйносов А. П. Кусочно-линейная регрессия для оценки зон скольжения // Транспорт Урала. 2024. № 1 (80). С. 30–34. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-30-34.
5. Кротов С. В., Кононов Д. П., Буйносов А. П. Местные напряжения в колесных парах при торможении железнодорожного подвижного состава // Транспорт Урала. 2021. № 1 (68). С. 15–19. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-15-19.
6. Кротов С. В., Кононов Д. П., Буйносов А. П. Влияние проката колеса грузового вагона на контактно-усталостную долговечность // Транспорт Урала. 2022. № 4 (75). С. 11–15. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-4-11-15.
7. Кротов С. В., Кононов Д. П., Воробьев А. А. Контакт железнодорожного колеса с рельсом. Казань : Общество с ограниченной ответственностью «Бук», 2023. 146 с.
8. Кротов С. В. Основы теории несущей способности прессовых соединений колесных пар железнодорожных вагонов. Москва : УМЦ ЖДТ, 2011. 152 с.
9. Кротов С. В., Сладковски А. В. Факторный анализ расчета несущей способности колесной пары вагона // Транспорт Урала. 2012. № 2 (33). С. 36–40. ISSN 1815-9400.
10. Кротов С. В. Факторный анализ несущей способности колесной пары железнодорожного вагона. Ростов-на-Дону : РГУПС, 2011. 137 с.
11. Кротов В. П., Кротов С. В. Оценка несущей способности колесной пары при повышенных нагрузках // Вестник РГУПС. 2005. № 1. С. 35–39. ISSN 0201-727X.
12. Кротов С. В., Кротов В. П. Классификация параметров несущей способности прессового соединения колесной пары железнодорожного транспортного средства // Вестник РГУПС. 2007. № 2 (26). С. 22–28. ISSN 0201-727X.
13. Повышение работоспособности колесных пар подвижного состава / О. С. Валинский, А. А. Воробьев, С. И. Губенко [и др.]. Казань : Бук, 2022. 324 с.
14. Кудрявцев Н. Н., Сасковец В. М. Динамические нагрузки ходовых частей грузовых вагонов // Труды ЦНИИ МПС. 1977. Вып. 572. 143 с.

References

1. Braverman E. M., Muchnik I. B. Structural data processing methods. Moscow : Science, 1983. 464 p. (In Russian).
2. Afifi A., Azen S. Statistical analysis: a computer oriented approach. Moscow : World, 1982. 488 p. (In Russian).
3. Borovikov V. P. Popular introduction to the program STATISTICA. Moscow : ComputerPress, 1998. 267 p. (In Russian).
4. Krotov S. V., Kononov D. P., Buynosov A. P. Piecewise linear regression for estimating slip zones. *Transport of the Urals*. 2024. No. 1 (80). Pp. 30–34. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-30-34. (In Russian).
5. Krotov S. V., Kononov D. P., Buynosov A. P. Local stresses in wheelsets at braking of railway rolling stock. *Transport of the Urals*. 2021. No. 1 (68). Pp. 15–19. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-15-19. (In Russian).
6. Krotov S. V., Kononov D. P., Buynosov A. P. Influence of freight car wheel mileage on contact and fatigue durability. *Transport of the Urals*. 2022. No. 4 (75). Pp. 11–15. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-4-11-15. (In Russian).
7. Krotov S. V., Kononov D. P., Vorobyev A. A. Contact of the railway wheel with the rail. Kazan : Book, 2023. 146 p. (In Russian).
8. Krotov S. V. Basics of theory on carrying capacity of press-fit connections of wheelsets for railway cars. Moscow : UMTs ZhDT, 2011. 152 p. (In Russian).
9. Krotov S. V., Stadkowski A. Factor analysis of bearing capacity calculation of railcar's wheel set. *Transport of the Urals*. 2012. No. 2 (33). Pp. 36–40. ISSN 1815-9400. (In Russian).
10. Krotov S. V. Factor analysis of bearing capacity calculation of railcar's wheel set. Rostov-on-Don : RGUPS., 2011. 137 p. (In Russian).
11. Krotov V. P., Krotov S. V. Estimation of wheelset bearing capacity at increased loads. *Vestnik RGUPS*. 2005. No. 1. Pp. 35–39. ISSN 0201-727X. (In Russian).
12. Krotov S. V., Krotov V. P. Classification of parameters of bearing capacity of railway vehicle wheel set press-fit connection. *Vestnik RGUPS*. 2007. No. 2 (26). Pp. 22–28. ISSN 0201-727X. (In Russian).
13. Valinskiy O. S., Vorobyev A. A., Gubenko S. I. [et al.]. Improving the performance of wheel sets of rolling stock. Kazan : Book, 2022. 324 p. (In Russian).
14. Kudryavtsev N. N., Saskovets V. M. Dynamic loads of car running gear. *Proceedings of the Ministry of Railways Central Research Institute*. 1977. Issue 572. 143 p. (In Russian).

Объем статьи 0,55 авторских листа

Научная статья

УДК 519.242.5: 621.785.6:621.785.7

Математическое моделирование упрочняющей термической обработки винтовых пружин подвижного состава

 Дмитрий Валерьевич Муравьев¹, Алексей Викторович Обрывалин¹
¹Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия

Mathematical modeling of strengthening heat treatment of screw springs of rolling stock

 Dmitry V. Murav'ev¹, Alexey V. Obryvalin¹
¹Omsk State Transport University, Omsk, Russia

Аннотация

Статья посвящена оптимизации режимов закалки и отпуска рессорно-пружинной стали 60С2 на основании применения теории планирования инженерного эксперимента. Актуальность работы подтверждена измерениями твердости стали винтовых пружин вагонов, которая не соответствует требованиям нормативно-технической документации. Таким образом, обоснована необходимость уточнения значений температур закалки и отпуска при изготовлении пружин. Проведен эксперимент, который позволил получить математическую модель в виде уравнения регрессии второго порядка для прогнозирования твердости в зависимости от температур закалки и отпуска стали и установить оптимальные значения этих параметров для достижения требуемой твердости 40–46,5 HRC согласно ГОСТ 1452-2011.

Ключевые слова: сталь, пружина, излом, температура, закалка, отпуск, твердость, оптимизация, эксперимент, модель, адекватность

Abstract

The article is devoted to the optimization of the quenching and tempering modes of 60C2 spring steel based on the application of the theory of planning an engineering experiment. The relevance of the work is confirmed by measurements of the hardness of the steel of the screw springs of railway cars, which does not meet the requirements of regulatory and technical documentation. Thus, the need to clarify the values of quenching and tempering temperatures in the manufacture of springs is justified. An experiment was conducted that allowed us to obtain a mathematical model in the form of a second-order regression equation for predicting hardness depending on the tempering and tempering temperatures of steel and to establish the optimal values of these parameters to achieve the required hardness of 40–46,5 HRC according to GOST 1452-2011.

Keywords: steel, spring, fracture, temperature, quenching, tempering, hardness, optimization, experiment, model, adequacy

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-22-28

Винтовые пружины рессорного подвешивания подвижного состава эксплуатируются в условиях воздействия интенсивных циклических и знакопеременных нагрузок при движении вагонов и локомотивов в кривых участках, при прохождении рельсовых стыков и неровностей верхнего строения пути. Повышенные нагрузки, воспринимаемые деталями ходовой части, предъявляют высокие требования к физико-механическим и эксплуатационным свойствам рессорно-пружинных легированных и нелегированных сталей, которые должны обладать наилучшим сочетанием механических свойств, а именно твердости, упругости, предела выносливости, релаксационной стойкости при достаточной пластичности и вязкости. Указанные свойства достигаются за счет повышения содержания углерода до 0,5–0,8 % и за счет введения в химический состав рессорно-пружинных сталей легирующих элементов в виде кремния (1,5–2,8 %) и марганца (0,6–1,2 %), а также хрома, ванадия, прокаливаемость и закаливаемость стали, снижают склонность к росту аустенитного зерна и обезуглероживанию [1, 2].

Кроме того, весомым условием достижения эксплуатационных характеристик винтовых пружин является соблюдение технологии изготовления, которая включает следующие операции: нагрев прутка с подготовкой концов или без нее, навивку в горячем состоянии, закалку и отпуск, последующую осадку или заневоливание, шлифование торцов, дробеструйную обработку для создания сжимающих напряжений, способствующих повышению усталостной прочности [3]. В частности, значимым аспектом технологии является оптимизация режимов термической обработки на структуру троостит отпуска нормативной твердости [4].

В ходе проведения механических испытаний материала наружных винтовых пружин рессорного подвешивания пассажирских вагонов и фрактографических исследований поверхностей изломов подобных пружин, представленных на рис. 1а–в и реализованных в испытательной лаборатории «Металловедение и структурный анализ металлов и сплавов» Омского государственного университета путей сообщения, было установлено следующее:



Рис. 1. Поверхности изломов витков наружной надбуксовой пружины рессорного подвешивания тележки пассажирского вагона

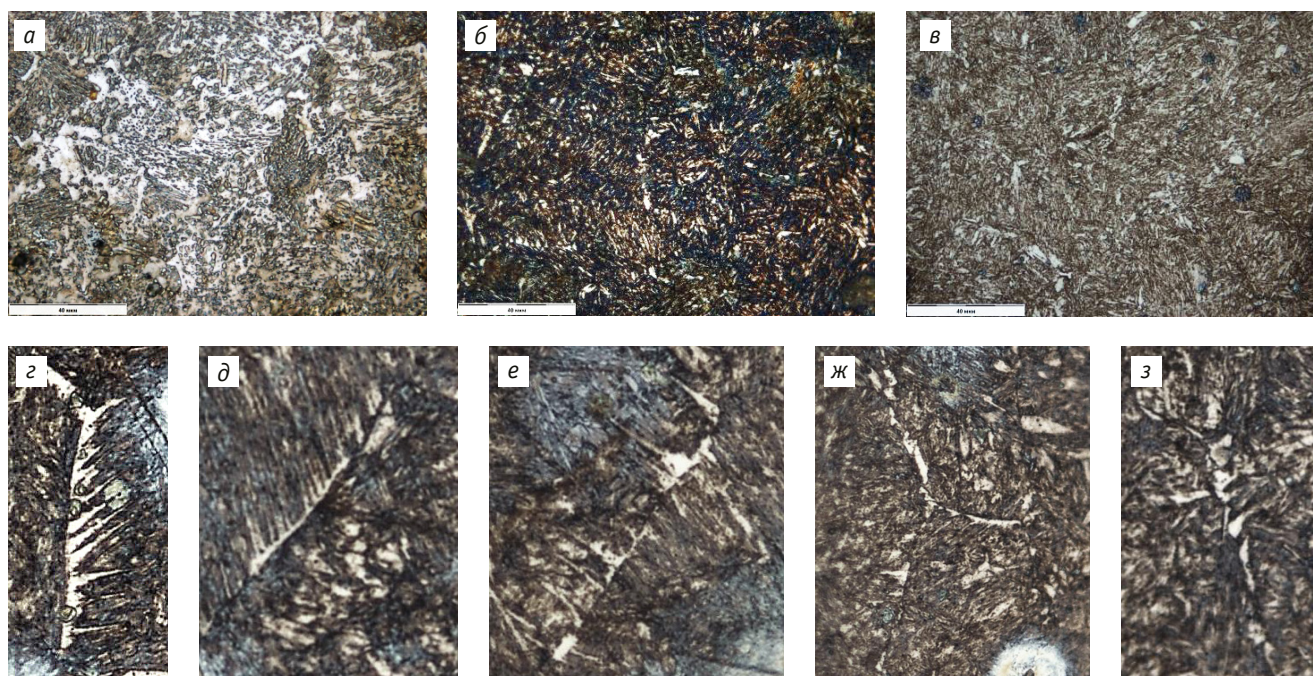


Рис. 2. Микроструктура стали 60С2 в отожженном состоянии (а) и после термической обработки (б) с твердостью 46–52 HRC со структурой троостомартенсита (в) и видманштеттовой ориентировкой феррита (г–з)

1) среднее значение твердости стали после 30 измерений составляет 47,83 HRC, превышая предельные значения 40–46,5 HRC, установленные по ГОСТ 1452-2011 [5], на 2,8–16,4 %, при этом максимальные значения твердости варьируются в диапазоне от 48,1 до 52,4 HRC и превышают порог допустимого значения твердости в 46,5 HRC на 3,3–11,2 %;

2) по микрорельефу и морфологии поверхности изломы являются мелкокристаллическими с ручьистым узором и неглубокими следами 1 (см. рис. 1а, б) усталостного развития трещины, указывающими направление разрушения от очагов деформации 2 и 3 в глубь витка пружины (см. рис. 1а, в).

Металлографические исследования микроструктуры рессорно-пружинной стали 60С2 винтовых пружин до и после термообработки по действующим на производстве режимам показали, что исходная феррито-перлитная микроструктура доэ-

фектоидной стали (рис. 2а) после закалки и среднего отпуска (рис. 2б) содержит атрибуты игольчатого строения (рис. 2в), идентичного структуре троостомартенсита повышенной твердости 40–50 HRC в соответствии с эталонами микроструктур по ГОСТ 32205-2013 [6].

Кроме того, в микроструктуре основного металла рабочих и опорных витков винтовых пружин не допускается наличие видманштеттовой ориентировки феррита (рис. 2г–з), встречающейся, однако, в микроструктуре стали разрушенных пружин. Появление видманштеттова феррита происходит в результате быстрого охлаждения предварительно перегретого аустенита с баллом действительного зерна крупнее номера 5, согласно ГОСТ 5639-82, с недостаточной критической скоростью. Кристаллы феррита при охлаждении растут в определенной ориентационной связи с кристаллографическими плоскостями решетки

Таблица 1

аустенита, в результате чего образуются кристаллы пластинчатой и игольчатой формы (см. рис. 2г–з).

Таким образом, стали с видманштеттовой структурой, в особенности рессорно-пружинные, имеют низкую ударную вязкость, усталостную прочность и высокую склонность к хрупкому разрушению [7], что недопустимо при эксплуатации винтовых пружин, однако, случается (см. рис. 1а–в).

Итак, резюмируя результаты проведенного исследования механических свойств рессорно-пружинных сталей, можно констатировать, что основной проблемой, способствующей хрупкому разрушению винтовых пружин подвижного состава, является повышение твердости и последующее охрупчивание стали из-за несоблюдения требований технологии и режимов термической обработки при нагреве и охлаждении [8, 9].

Устранение проблемы возможно путем:

1) анализа действующей нормативно-технической документации и национальных государственных стандартов, устанавливающих требования к режимам проведения окончательной термической обработки рессорно-пружинных сталей при изготовлении винтовых пружин подвижного состава;

2) планирования промышленного эксперимента по результатам мониторинга априорной информации о рекомендуемых в настоящее время режимах закалки и отпуска рессорно-пружинных сталей, обеспечивающих достижение требуемой твердости и усталостной прочности, с целью снижения вероятности разрушения винтовых пружин в эксплуатации;

3) реализации активного воспроизводимого эксперимента по изучению термической обработки высокоуглеродистых рессорно-пружинных сталей, позволяющего, варьируя значениями температур закалки и отпуска, наблюдать изменения твердости образца выбранной марки стали, последующей обработки и интерпретации результатов эксперимента;

4) обоснования выводов и рекомендаций по установлению новых или корректировке действующих режимов термической обработки, а именно закалки и отпуска стали, способствующих обе-

Факторы и уровни их варьирования

Параметр	Фактор			
	Температура закалки $T_{\text{зак}}$, °С		Температура отпуска $T_{\text{отп}}$, °С	
	x_1		x_2	
	натуральное значение	кодированное значение	натуральное значение	кодированное значение
Интервал варьирования	50	I_1	50	I_2
Основной уровень	870	0	470	0
Верхний уровень	920	+1	520	+1
Нижний уровень	820	-1	420	-1
Промежуточный уровень № 1	895	+0,5	495	+0,5
Промежуточный уровень № 2	845	-0,5	445	-0,5
Промежуточный уровень № 3	913	+0,866	513	+0,866
Промежуточный уровень № 4	827	-0,866	427	-0,866

спечению заявленной в технической документации твердости при изготовлении винтовых пружин.

С целью определения оптимальных режимов термической обработки при закалке винтовых пружин вагонов проведен научный физический эксперимент, основанный на применении сверхнасыщенного ротатбельного некомпозиционного плана второго порядка Бокса — Бенкина для двух факторов, позволяющий получить математическую модель объекта исследования с одинаковой точностью предсказания во всех точках области эксперимента. Исследовалась операция термической обработки, включающая последовательные циклы полной закалки и среднего отпуска предварительно отожженной стали 60С2, применяемой для изготовления винтовых пружин в соответствии с ГОСТ 1452-2011.

Для установления оптимальных режимов термообработки функция оптимизации была отведена твердости стали НРС после закалки и отпуска, регламентируемой требованиями ГОСТ 1452–2011, а в качестве факторов, влияющих на указанный параметр, определены температуры нагрева при закалке $T_{\text{зак}}$ и отпуске $T_{\text{отп}}$ стали [10].

Таким образом, задача сводилась к построению адекватной математической модели объекта исследования, отражающей зависимость твердости от темпе-

ратуры закалки и отпуска на примере рессорно-пружинной стали 60С2, применяемой при изготовлении винтовых пружин помимо сталей 55С2, 55С2А, 60С2А, 60С2ХА, 60С2ХФА и 65С2ВА.

Анализ априорной информации позволил определить область эксперимента, совместная граница которой для двух факторов строилась на плоскости вокруг центра эксперимента, путем вычитания из основного уровня каждого из факторов или прибавления к нему интервалов их варьирования (табл. 1). Натуральные координаты центра эксперимента задавались значениями основных уровней температуры закалки и отпуска для стали 60С2 в 870 и 470 °С соответственно исходя из данных марочников сталей и сплавов [11], а интервалы варьирования факторов были выбраны с учетом диапазона допустимых отклонений температур закалки и отпуска рессорно-пружинной стали 60С2 согласно ГОСТ 14959-2016 [12]. В результате были установлены экспериментальные значения рассматриваемых факторов, которые определили условия проведения отдельных опытов (см. табл. 1).

Скорость нагрева в печах сплавов в отожженном состоянии не ограничивалась и определялась производительностью применяемой модели муфельной печи. При проведении эксперимента время изотермической выдержки образ-



Таблица 2

Матрица планирования эксперимента
в натуральных и кодированных значениях факторов

№ опыта	$T_{\text{закл}} \text{ } ^\circ\text{C}$	x_1	$T_{\text{отп}} \text{ } ^\circ\text{C}$	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2	\bar{y}_j	\hat{y}_j
								HRC	HRC
1	920	+	470	0	0	+	0	46,2	45,202
2	820	-	470	0	0	+	0	44,1	45,202
3	895	+0,5	513	+0,866	+0,433	+0,25	+0,75	41,0	40,8467
4	895	+0,5	427	-0,866	-0,433	+0,25	+0,75	47,3	47,7963
5	845	-0,5	513	+0,866	-0,433	+0,25	+0,75	40,9	40,8467
6	845	-0,5	427	-0,866	+0,433	+0,25	+0,75	48,5	47,7963
7	870	0	470	0	0	0	0	44,0	44,028
8	870	0	470	0	0	0	0	44,0	44,028
9	870	0	470	0	0	0	0	43,5	44,028
10	870	0	470	0	0	0	0	44,3	44,028

цов при постоянной температуре в процессе закалки и отпуска выбиралось исходя из размеров образцов 10×10×10 мм с расчетом 60–75 с на прогрев 1 мм по толщине образца. Таким образом, время выдержки при закалке и при отпуске составило соответственно 15 и 10 мин. Охлаждение образцов производилось в индустриальном масле [13]. Всего было поставлено 10 опытов при условиях, описанных в матрице планирования эксперимента (табл. 2). Последующие расчеты выполнялись в кодированных значениях факторов x_1 и x_2 .

Измерения твердости проводились согласно ГОСТ 9013-59 на твердомере Роквелла Instron Rockwell® R 574 Wilson Instruments [14]. Значения твердости \bar{y}_j , представленные в табл. 2, были получены как среднеарифметические значения по результатам пяти измерений в контрольных точках, распределенных равномерно по поверхности образцов.

Математическая модель объекта исследования в соответствии с постулатами теории планирования эксперимента представляется как полиномиальное уравнение регрессии второй степени вида

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2, \quad (1)$$

а неизвестные коэффициенты регрессии рассчитывали по методу наименьших квадратов, оперируя массивом полученных данных значений твердости образцов после термообработки (см. табл. 2):

$$b_0 = 43,95; b_1 = 0,51667; b_2 = -4,01247;$$

$$b_{12} = 0,75053; b_{11} = 1,19935; b_{22} = 0,22747.$$

Таким образом, по результатам расчета коэффициентов было получено уравнение регрессии искомой математической модели

$$y = 43,95 + 0,51667x_1 - 4,01247x_2 + 0,75053x_1x_2 + 1,19935x_1^2 + 0,22747x_2^2.$$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии по t -критерию Стьюдента [15] позволила отсеять незначимые коэффициенты, после чего полученное уравнение регрессии приняло следующий вид:

$$y = 43,95 - 4,01247x_2 + 1,19935x_1^2.$$

Однако в результате исключения из рассмотрения коэффициента b_{22} оставшиеся коэффициенты b_0 и b_{11} были пересчитаны по методу наименьших квадратов после составления системы уравнений

$$\begin{cases} b_0N + b_2 \sum_{j=1}^N x_{2j} + b_{11} \sum_{j=1}^N x_{1j}^2 = \sum_{j=1}^N y_j; \\ b_0 \sum_{j=1}^N x_{2j} + b_2 \sum_{j=1}^N x_{2j}^2 + b_{11} \sum_{j=1}^N x_{1j}^2 x_{2j} = \sum_{j=1}^N x_{2j} y_j; \\ b_0 \sum_{j=1}^N x_{1j}^2 + b_2 \sum_{j=1}^N x_{1j}^2 x_{2j} + b_{11} \sum_{j=1}^N x_{1j}^4 = \sum_{j=1}^N x_{1j}^2 y_j. \end{cases}$$

Подстановка значений сумм позволила получить систему уравнений

$$\begin{cases} b_0 \cdot 10 + b_2 \cdot 0 + b_{11} \cdot 3 = 443,8; \\ b_0 \cdot 0 + b_2 \cdot 3 + b_{11} \cdot 0 = -12,0374; \\ b_0 \cdot 3 + b_2 \cdot 0 + b_{11} \cdot 2,25 = 134,725, \end{cases}$$

решение которой способствовало уточнению значений коэффициентов, а именно $b_0 = 44,028$, $b_2 = -4,01247$, $b_{11} = 1,17407$.

При этом окончательная форма записи уравнения регрессии приняла следующий вид:

$$y = 44,028 - 4,01247x_2 + 1,17407x_1^2. \quad (2)$$

Верификация гипотезы об адекватности математической модели проводилась сравнением расчетного значения

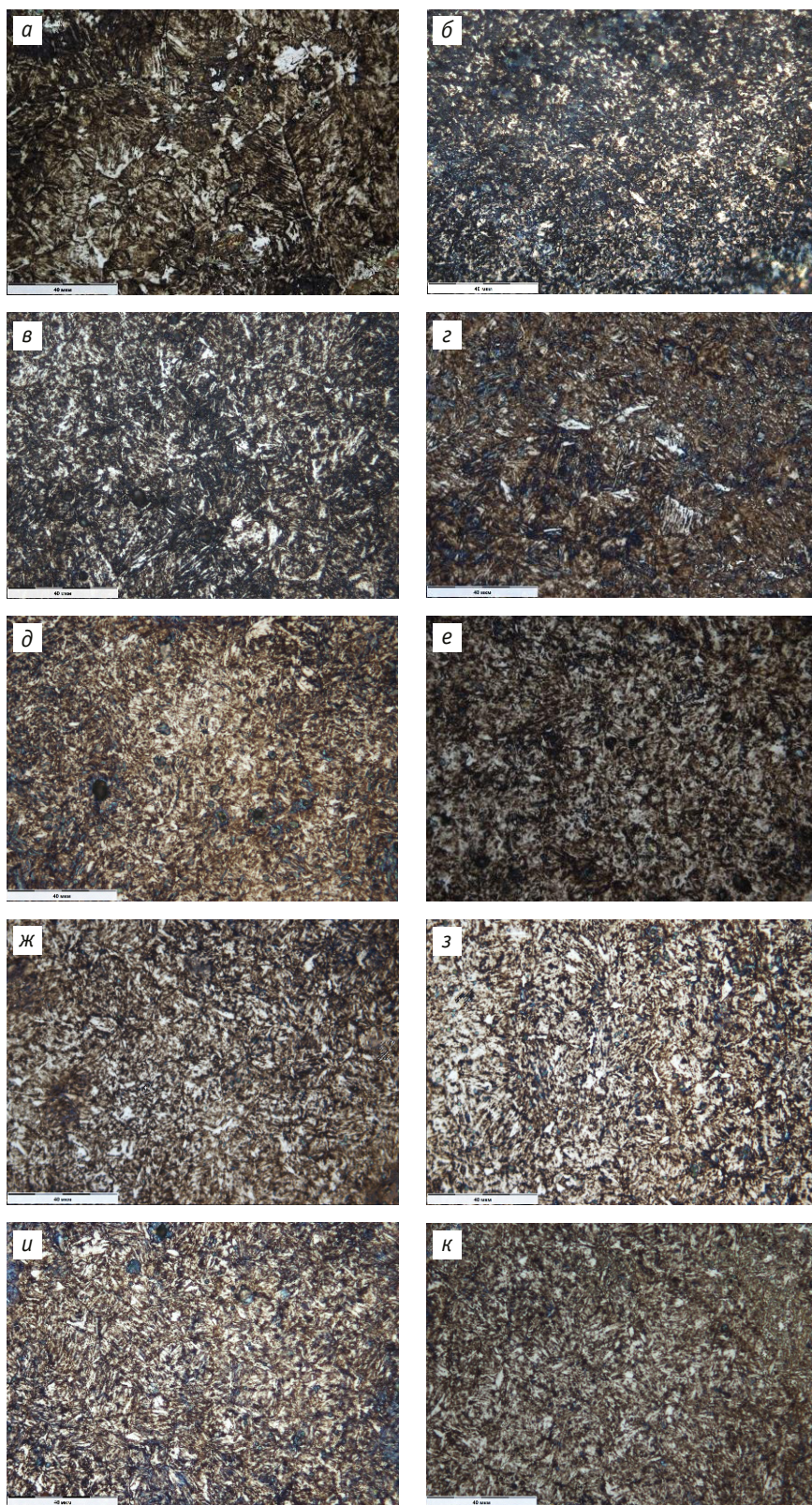


Рис. 3. Микроструктура экспериментальных образцов рессорно-пружинной стали 60С2 после закалки и среднего отпуска на структуру троостит отпуска:
а–к — образцы № 1–№ 10 соответственно

критерия Фишера $F_{расч} = 6,82$ с табличным значением, которое было выбрано исходя из числа степеней свободы $q_1 = N - k' - (n_0 - 1) = 4$ для числителя, $q_2 = n_0 - 1 = 4 - 1 = 3$ для знаменателя при установленном уровне значимости 0,05 и составило 9,12 [15].

На основе проведенных расчетов установлено, что $F_{расч} < F_{табл}$ значит, полученная математическая модель может прогнозировать значение функции отклика с заранее заданной точностью.

Для перехода от кодированной формы записи математической модели к натуральной следует использовать выражение

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}}{I_i}, \quad (3)$$

где x_i — кодированное значение i -го фактора; \tilde{x}_i — натуральное значение i -го фактора (в единицах измерения); \tilde{x}_{i0} — натуральное значение основного уровня фактора; I_i — интервал варьирования натурального значения i -го фактора.

При помощи данных, приведенных в табл. 1, составлены формулы для перехода к натуральной форме записи факторов x_1 (температура закалки $T_{зак}$) и x_2 (температура отпуска $T_{отп}$):

$$x_1 = \frac{T_{зак} - 870}{50}; \quad (4)$$

$$x_2 = \frac{T_{отп} - 470}{50}, \quad (5)$$

которые после подстановки в уравнение $y = f(x_1; x_2)$ позволили представить зависимость в натуральных единицах измерения факторов:

$$HRC = 44,028 - 4,01247 \cdot \left(\frac{T_{отп} - 470}{50} \right) + 1,17407 \cdot \left(\frac{T_{зак} - 870}{50} \right)^2; \quad (6)$$

$$HRC = 437,4885 - 0,08025 \cdot T_{отп} - 0,8172 \cdot T_{зак} + 0,00047 \cdot T_{зак}^2.$$

На рис. 3а, б представлены графические изображения построенной в MathCAD полиномиальной зависимости твердости рессорно-пружинной стали 60С2 от температур закалки и отпуска

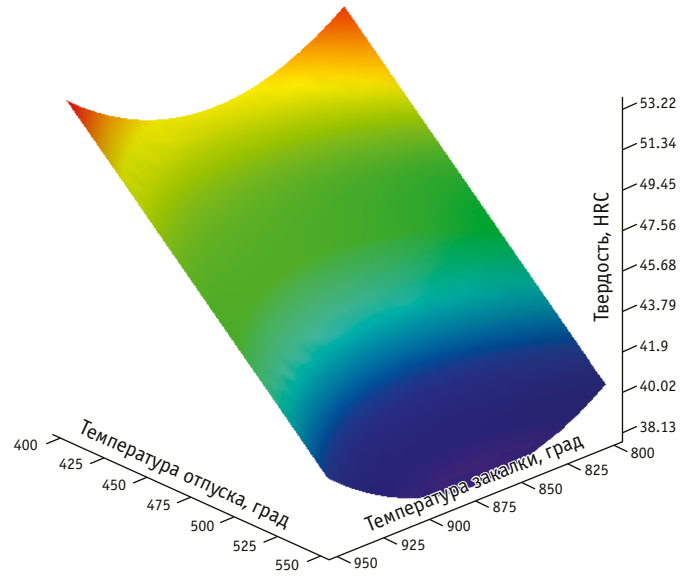
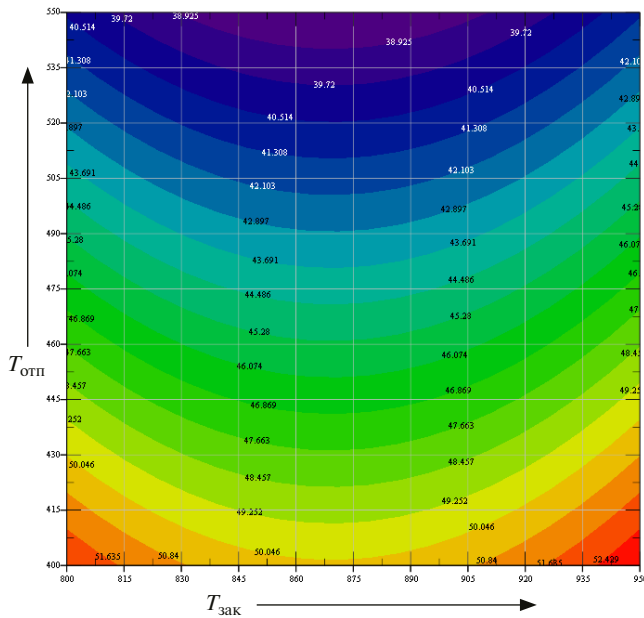


Рис. 4. Зависимость твердости HRC рессорно-пружинной стали 60С2 от температуры закалки $T_{зак}$ и отпуска $T_{отп}$ при окончательной термической обработке:
 а — линии равного отклика твердости HRC; б — геометрическая интерпретация поверхности отклика твердости HRC

на плоскости в виде параболических линий равного отклика и в трехмерной системе координат в виде поверхности отклика второго порядка.

Анализ графиков предоставил возможность альтернативного выбора оптимальных сочетаний температур закалки и отпуска с целью достижения требуемой твердости для основных марок рессорно-пружинной стали по ГОСТ 1452-2011 в диапазоне от 40 до 46,5 HRC [5].

Спланированный и проведенный эксперимент позволил получить результаты и сформулировать следующие выводы.

1. Построена математическая модель вида $HRC = f(T_{зак}; T_{отп})$, предназначенная для интерполирования значений твердости рессорно-пружинных сталей на примере стали 60С2, применяемых для изготовления винтовых пружин подвижного состава, в зависимости от температуры закалки и отпуска при термической обработке в процессе их производства.

2. Металлографический анализ микрошлифов после термообработки позволил получить изображения микроструктуры всех образцов, которые представлены на рис. 3а–к. Установлено, что в образце № 1 (см. рис. 3а) при быстром охлаждении после нагрева до температуры закалки в 920 °C преобладает видманшеттова структура феррита, соответствующая эталону 18 по ГОСТ 32205-2013, что недопустимо для рабочих и опорных витков винтовых пружин подвижного состава. Этот факт указывает на перегрев стали перед закалкой и, вероятно, на снижение скорости охлаждения.

Кроме того, в образце № 4 (см. рис. 3г) с твердостью после закалки в 47,3 HRC также присутствуют признаки видманшеттова феррита с характерной «гребневидной» ориентацией игл. Стоит отметить, что образцы № 2 (см. рис. 3б), № 3 (см. рис. 3в) и № 5 (см. рис. 3д) твердостью 44,1, 41 и 40,9 HRC

соответственно обладают удовлетворительной структурой троостита отпуска мелко- и среднеигльчатого строения с расположением феррита в виде отдельных выделений и прожилков по границам зерен, идентичную эталону 11 по ГОСТ 32205-2013 (приложение Б, шкала 2). Микроструктура троостита отпуска образцов № 7 – № 10 конгруэнтна микроструктуре эталона 3 по ГОСТ 32205-2013 (приложение Б, шкала 2), что свидетельствует о реализации подходящих режимов термообработки.

В целом по результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Геометрическая интерпретация зависимости (б), представленная на рис. 4, позволила установить, что для достижения требуемой по ГОСТ 1452-2011 твердости в 40–46,5 HRC температуру закалки стали 60С2 допускается изменять в интервале 840–900 °C в сочетании с температурой отпуска в диапазоне 450–540 °C соответственно в отличие от диапазонов благоприятных температур закалки в 870±15 °C и отпуска 470±50 °C, регламентируемых требованиями ГОСТ 14959-2016. Следовательно, предлагается с учетом температуры критической точки A_{c3} стали 60С2, равной 820 °C, скорректировать референтный интервал температуры закалки до значений 870±25 °C, а температуры отпуска до 480±40 °C во избежание в то же время роста зерна аустенита при нагреве стали до температуры закалки выше точки A_{c3} .

2. Определен горизонт дальнейших исследований, предполагающий построение подобных математических моделей для всех марок рессорно-пружинных сталей, а именно 55С2А, 60С2А, 60С2ХА, 60С2ХФА и 65С2ВА по отдельности, с использованием разных значений основных уровней и интервалов варьирования факторов, устанавливаемых согласно рекомендуемым значениям для указанных сталей по ГОСТ 14959-2016.

3. Перспективный интерес представляет построение аналогичных математических моделей прогнозирования твердости термически обработанных сталей в зависимости от скоростей охлаждения $V_{\text{зак}}$ и $V_{\text{отп}}$ соответственно при закалке и отпуске винтовых пружин. Кроме того, актуально совершенствование полученной математической модели путем ввода в нее в ка-

честве новых факторов x_3 и x_4 скоростей охлаждения по отдельности или комбинированно для детального описания процесса и корректирования режимов термической обработки.

4. Модель может применяться для выбора оптимальных режимов термической обработки при закалке винтовых пружин на требуемую твердость.

Сведения об авторах:

Дмитрий Валерьевич Муравьев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Омского государственного университета путей сообщения

Алексей Викторович Обрывалин, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Омского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Dmitry V. Murav'ev, PhD in Engineering, Associate Professor of Technologies of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock Department, Omsk State Transport University

Alexey V. Obryvalin, PhD in Engineering, Head of Technologies of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock Department, Omsk State Transport University

Литература

1. Рахштадт А. Г. Пружинные стали и сплавы. Москва : Metallurgy, 1982. 401 с.
2. Callister W. D., Jr. Materials science and engineering : an introduction. 2007. 975 p.
3. Способ и устройство для изготовления винтовых пружин / А. В. Муртазин, В. Н. Муртазин, В. В. Трошков [и др.] : пат. 2501620 Рос. Федерация. № 2010152885/02 ; заявл. 23.12.2010 ; опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35.
4. Материаловедение для транспортного машиностроения / Э. Р. Галимов, Л. В. Тарасенко, М. В. Унчикова, А. Л. Абдуллин. Санкт-Петербург : Лань, 2022. 448 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/211337> (дата обращения: 21.07.2023).
5. ГОСТ 1452-2011. Пружины цилиндрические винтовые тележек и ударно-тяговых приборов подвижного состава железных дорог. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2011. 15 с.
6. ГОСТ 32205-2013. Пружины рессорного подвешивания железнодорожного подвижного состава. Шкала эталонов микроструктур. Москва : Стандартинформ, 2014. 19 с.
7. Шестопалова Л. П., Лихачева Т. Е. Методы исследования материалов и деталей машин при проведении автотехнической экспертизы. Москва : МАДИ, 2017. 180 с.
8. Титов А. В. Влияние режимов термической обработки на микроструктуру пружин ответственного назначения из стали 60С2А и титанового сплава ВТ16 // Металлообработка. 2015. № 5 (89). С. 43–49. ISSN 1684-6702.
9. Термическая обработка пружин железнодорожного транспорта / Г. А. Околович, Д. В. Кураков, Т. Г. Шарикова, С. А. Чекалина // Ползуновский альманах. 2015. № 2. С. 141–145. ISSN 2079-1097.
10. Meshref A., Mazen T. M. Influence of Heat Treatment Temperature on the Strain Hardening Exponent and Strength Coefficient of AISI 4140 Alloy Steel // International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS). 2019. Vol. 3. Issue 7. Pp. 41–46. ISSN 2643-640X.
11. Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский [и др.]. Москва : Машиностроение, 2003. 784 с.
12. ГОСТ 14959-2016. Металлопродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2017. 27 с.
13. Контроль качества термической обработки стальных полуфабрикатов и деталей / Под общ. ред. В. Д. Кальнера. Москва : Машиностроение, 1984. 384 с.
14. ГОСТ 9013-59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. Москва : ИПК Издательство стандартов, 2001. 8 с.
15. Капустьян М. Ф., Муравьев Д. В. Методы планирования эксперимента при моделировании технологических процессов. Ч. 2. Омск : ОмГУПС, 2016. 32 с.

References

1. Rakhshadt A. G. Spring steels and alloys. Moscow : Metallurgy, 1982. 401 p. (In Russian).
2. Callister W. D., Jr. Materials science and engineering : an introduction. 2007. 975 p.
3. Murtazin A. V., Murtazin V. N., Troshkov V. V. [et al.]. Method and device for manufacturing screw springs. Patent 2501620 Russian Federation. No. 2010152885/02 ; filed 23.12.2010 ; publ. 20.12.2013, Bulletin No. 35. (In Russian).
4. Galimov E. R., Tarasenko L. V., Unchikova M. V., Abdullin A. L. Materials science for transport engineering. St. Petersburg : Lan, 2022. 448 p. URL: <https://e.lanbook.com/book/211337> (access date: 21.07.2023). (In Russian).
5. ГОСТ 1452-2011. Helical springs for trucks and draw-and-buffer gears of railway rolling stock. Specifications. Moscow : Standardinform, 2011. 15 p. (In Russian).
6. ГОСТ 32205-2013. Springs of spring suspension of railway rolling stock. Scale of microstructure standards. Moscow : Standardinform, 2014. 19 p. (In Russian).
7. Shestopalova L. P., Likhacheva T. E. Methods of research of materials and machine parts during the automotive technical expertise. Moscow : MADI, 2017. 180 p. (In Russian).
8. Titov A. V. The effect of heat treatment on the microstructure of springs for critical applications of steel 60S2A and titanium alloy VT16. *Metalworking*. 2015. No. 5 (89). Pp. 43–49. ISSN 1684-6702. (In Russian).
9. Okolovich G. A., Kurakov D. V., Sharikova T. G., Chekalina S. A. Heat treatment of springs of railway transport. *Polzunovsky Almanac*. 2015. No. 2. Pp. 141–145. ISSN 2079-1097. (In Russian).
10. Meshref A., Mazen T. M. Influence of Heat Treatment Temperature on the Strain Hardening Exponent and Strength Coefficient of AISI 4140 Alloy Steel. *International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS)*. 2019. Vol. 3. Issue 7. Pp. 41–46. ISSN 2643-640X.
11. Zubchenko A. S., Koloskov M. M., Kashirskiy Yu. V. [et al.]. Vintage of steels and alloys. Moscow : Machinery, 2003. 784 p. (In Russian).
12. ГОСТ 14959-2016. Spring nonalloy and alloy steel products. Specifications. Moscow : Standardinform, 2017. 27 p. (In Russian).
13. Quality control of heat treatment of semi-finished steel products and parts : under the general editorship by V. D. Kalner. Moscow : Machinery, 1984. 384 p. (In Russian).
14. ГОСТ 9013-59. Metals. Method of measuring Rockwell hardness. Moscow : Publishing House of Standards, 2001. 8 p. (In Russian).
15. Kapust'yan M. F., Murav'ev D. V. Methods of experiment planning in the modeling of technological processes. Part 2. Omsk : OSTU, 2016. 32 p. (In Russian).

Научная статья
УДК 629.4.043.2

Моделирование аварийного столкновения грузового локомотива с полувагоном в порожнем и груженом состоянии

Михаил Владимирович Жуйков¹, Александр Эдуардович Павлюков¹, Александр Васильевич Смольянинов¹

¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

Simulation of an emergency collision of a freight rolling stock with an empty and loaded gondola car

Mikhail V. Zhuykov¹, Alexander E. Pavlyukov¹, Alexander V. Smolyaninov¹

¹Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

В статье представлены результаты, полученные при численном моделировании столкновения грузового локомотива с полувагоном в порожнем и груженом состоянии и позволяющие оценить работоспособность системы пассивной безопасности (СПБ) локомотива. Для моделирования использовались два метода: метод конечных элементов (МКЭ) и метод дискретных элементов (МДЭ). Сочетание МКЭ и МДЭ дает возможность оценить влияние сыпучего груза, находящегося в момент столкновения в кузове полувагона, на необратимые пластические деформации каркаса кабины машиниста и на разрушение остекления кабины. По результатам численного моделирования определено поглощение кинетической энергии удара средствами пассивной безопасности, а также изменение ускорений в местах установки кресел машиниста.

Ключевые слова: аварийное столкновение, грузовой локомотив, система пассивной безопасности, полувагон, метод конечных элементов, метод дискретных элементов, сыпучий груз, поглощение кинетической энергии, деформация, ускорение

Abstract

The article presents the results received under numerical simulation of a collision of a freight rolling stock with an empty and loaded gondola car, and allowing to evaluate the efficiency of a locomotive passive safety system (SPS). Two methods have been used for the simulation: finite-element method (FEM) and discrete element method (DEM). The combination of FEM and DEM makes it possible to evaluate the influence of bulk material at the moment of collision in the body of a gondola car upon inevitable plastic deformations of the driver's cabin frame and upon the destruction of the glazing area of the cabin. On the results of the numerical simulation the absorption of the kinetic energy shock due to the passive safety system has been determined, as well as changes of accelerations in the places of the driver's seats settings.

Keywords: emergency collision, freight locomotive, passive safety system, gondola car, finite-element method, discrete element method, bulk materials, kinetic energy absorption, deformation, acceleration

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-29-34

ВВЕДЕНИЕ

При столкновениях грузовых локомотивов на железнодорожных переездах наибольшую опасность для локомотивной бригады представляют грузовые автомобили, перевозящие различные сыпучие грузы (например, щебень [1], сельскохозяйственную продукцию [2] и др.). Кроме того, столкновения локомотивов с препятствиями случаются не только на железнодорожных переездах, но и на железнодорожных путях. Происходят также столкновения локомотивов с головными полувагонами стоящих грузовых составов [3, 4], примеры таких столкновений представлены на рис. 1.

Соответственно особую актуальность приобретают разработка и реализация мер, позволяющих минимизировать травмированность и предотвратить возможную гибель членов локомотивных бригад, в том числе необходимы исследования по определению прочности остекленной кабины машиниста грузового локомотива при столкновении с порожним и груженым полувагоном.

В работах [5–7] прочность кабины машиниста грузовых локомотивов оценивалась при помощи линейного квазистатического расчета. Однако такие расчеты не могут корректно определить влияние сыпучего груза, находящегося в момент столкновения в кузове груженого полувагона, на необратимые пластические деформации каркаса кабины машиниста локомотива, а также на разрушение остекления (принято в качестве критерия обеспечения безопасности локомотивной бригады), поглощение кинетической энергии удара и изменение ускорений в местах установки кресел машиниста. Выполнить численное моделирование и оценить параметры влияния сыпучего груза на каркас кабины машиниста локомотива позволяет совместное использование метода конечных элементов (МКЭ) [8–10] и метода дискретных элементов (МДЭ) [11, 12] на основе уравнений движения в явной постановке с дискретизацией конечных элементов Лагранжевыми сетками.

В данной статье представлено исследование аварийного столкновения локомотива с полувагоном в порожнем и груженом состоянии на основе численного моделирования с использованием МКЭ и МДЭ. Цель исследования — выявить необратимые пластические деформации, возможное разрушение остекления, поглощение кинетической энергии и изменение продольных ускорений (в ме-

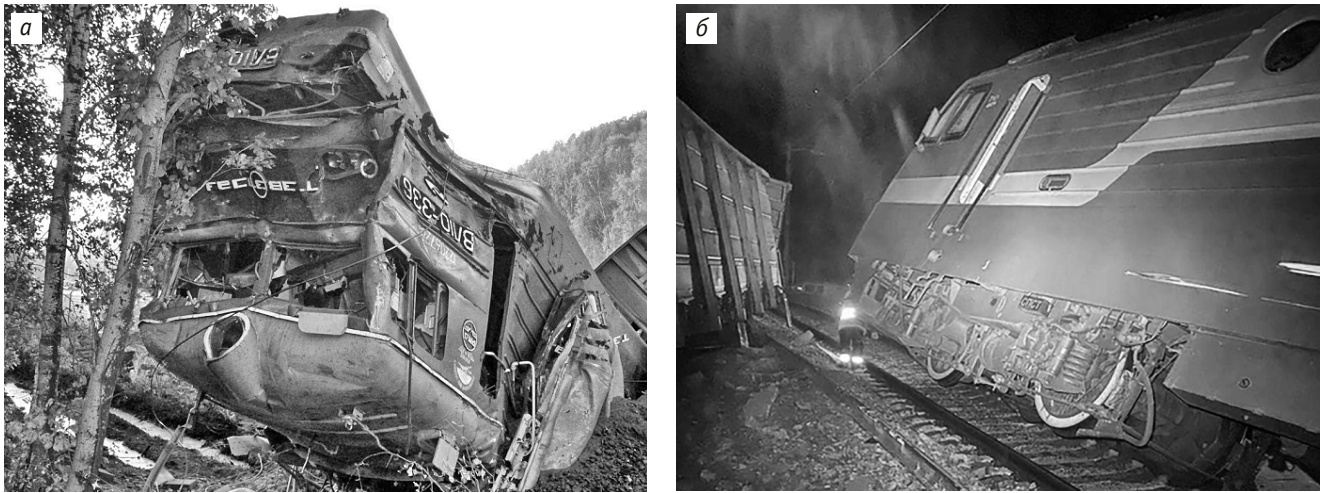


Рис. 1. Последствия столкновения локомотива с полувагонами:

а — разрушение кабины и средств пассивной безопасности; *б* — частичное смятие передней части локомотива и сход с рельсов

стах установки кресел машиниста) каркаса кабины машиниста грузового локомотива для оценки работоспособности средств пассивной защиты.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Численное моделирование динамических процессов столкновения основано на следующих принципах [13]: решение уравнений сохранения массы, импульса и энергии; определение тензоров напряжений; определение параметров нелинейного уравнения состояния с учетом формирования и распространения ударной волны; формирование разрешающих уравнений в упругой и упруго-пластической области деформирования, зависящих от скорости поведения материала, включая повреждение, разрушение и состояние после разрушения; явное временное интегрирование.

Математическая модель локомотива создана с использованием МКЭ [8–10], а математическая модель сыпучего груза — с использованием МДЭ, который был разработан Кандаллом для анализа задач, связанных с механикой горных пород [11, 12]. При численном моделировании МДЭ приняты следующие допущения: частицы рассматриваются как твердые тела с неизменяемой геометрией; деформация системы происходит за счет деформаций в точках контакта между частицами; контакт «частица — частица» возникает в точках контакта; используется контакт, допускающий небольшое перекрытие в точках контакта, при этом пе-

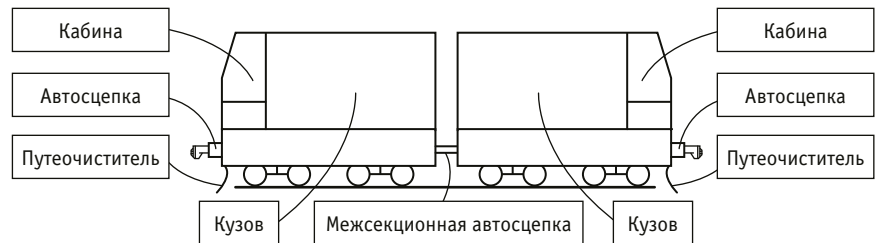


Рис. 2. Конструктивное решение СПБ современных отечественных грузовых локомотивов

рекрытие принимается намного меньшим по сравнению с размером, перемещением и вращением частиц; какое-либо взаимодействие между частицами происходит только в точках контакта; передается только усилие от частицы к контактирующей с ней частице на каждом временном шаге интегрирования; второй закон Ньютона используется для определения движения твердых частиц, ускорение и скорость постоянны на каждом временном шаге; шаг по времени позволяет возмущению распространяться лишь на ближайшую соседнюю частицу, а силы, действующие на частицу, определяются только взаимодействием с контактирующими частицами.

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА И ДОПУЩЕНИЯ

Каждый локомотив оснащен системой пассивной безопасности (СПБ). Основные подходы и положения концепции пассивной защиты для пассажирских поездов локомотивной тяги рассмотрены в работах [14, 15]. В состав СПБ локомотива входят устройства поглощения

энергии (УПЭ): автосцепные устройства, кабина машиниста, кузов, путеочистители. Принципиальное конструктивное решение СПБ современных российских грузовых локомотивов с расположением УПЭ представлено в работе [16] и на рис. 2. Критерии работоспособности системы пассивной безопасности — сохранение жизненного пространства для локомотивной бригады; ускорение в местах кресел машинистов не более 5g.

При исследовании аварийного столкновения грузового локомотива (масса одной секции принята 100 т) в качестве препятствия рассматривался полувагон в порожнем и груженом состоянии. Выбран полувагон модели 12-783 с тележками модели 18-100М (нагрузка от оси на рельсы 23,5 т). Масса сыпучего груза в кузове полувагона 43 т. Нормативная грузоподъемность полувагона модели 12-783 составляет не более 70 т. Сначала на математических моделях отработывались аварийные столкновения с полувагонами в порожнем состоянии, затем — с полувагонами в груженом состоянии,

перевозящими сыпучий груз. Шаг нагружения 10 т. Поскольку для полувагона в груженом состоянии начиная с 50 т результаты моделирования оказались некорректными, максимальная масса сыпучего груза была принята 43 т. Начальная скорость столкновения двух секций локомотива и одного прицепленного полувагона составляла 72 км/ч (20 м/с), препятствие (порожний/груженный полувагон) находилось в состоянии покоя.

Структура геометрической модели грузового локомотива представлена на рис. 3а и включает следующие составные части: две секции локомотива; полувагон, прицепленный ко второй секции; препятствие — отдельно стоящий (порожний/груженный) полувагон; железнодорожный путь. Секция грузового локомотива, в свою очередь, состоит из кузова, каркаса кабины машиниста с остеклением, двух тележек, путеочистителя, двух наклонных тяг и двух автосцепных устройств типа СА-3. Полувагон состоит из кузова (порожнего/заполненного грузом), рамы, двух тележек и двух автосцепных устройств типа СА-3. Железнодорожный путь имеет верхнее строение: рельсы типа Р65, шпалы и балласт. Фрагмент конечно-элементной модели показан на рис. 3б.

Начальные условия при постановке задачи: материал грузового локомотива с прицепленным полувагоном и препятствие не деформированы, все узлы локомотива с прицепленным полувагоном движутся с одинаковой скоростью в одном направлении, все элементы верхнего строения пути и препятствия находятся в покое. Кроме того, заданы объемные силы, обусловленные действием ускорения силы тяжести. Исследование аварийного столкновения производится до 0,20 с физического времени.

При изучении аварийного столкновения на основе численного моделирования использовался расчетный комплекс ANSYS 2023R 1 с решателем LS-DYNA R 13.1 [17, 18], выбраны метод конечных элементов и метод дискретных элементов с явной схемой интегрирования, учитывалась геометрическая и физическая нелинейность объекта исследования. Для кузовов локомотива и полувагона, каркаса кабины машиниста с остеклением, рам тележек локомотива и полу-

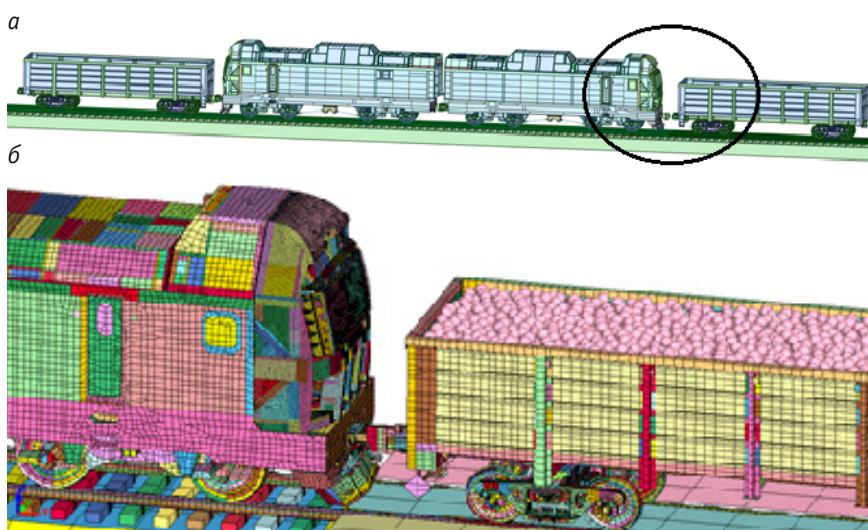


Рис. 3. Структура геометрической модели исследования столкновения на основе численного моделирования:
а — общий вид модели; б — фрагмент конечно-элементной модели

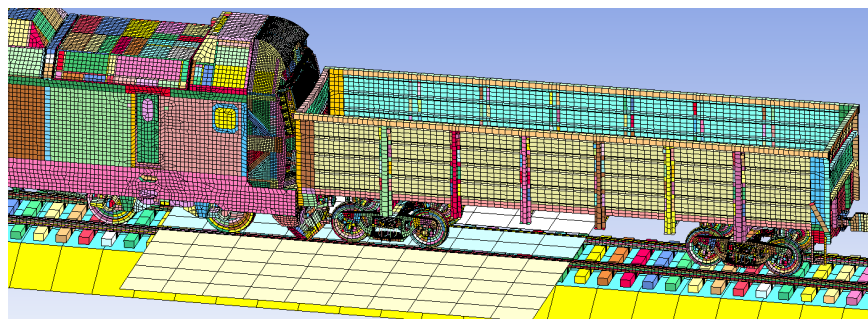


Рис. 4. Аварийное столкновение локомотива с полувагоном в порожнем состоянии

вагона, наклонных тяг, путеочистителей, корпусов автосцепок, маятниковых подвесок, ударных розеток, тяговых хомутов, корпусов поглощающих аппаратов применялись оболочечные конечные элементы; для колесных пар, рельсов и шпал — трехмерные гексаэдральные конечные элементы; для подвески ходовых частей, эластомерных амортизаторов и пружин фрикционных поглощающих аппаратов — одномерные конечные элементы, позволяющие имитировать линейную упруго-диссипативную связь между двумя узлами; для оборудования, локомотивной бригады — элементы распределенной массы. Общее количество одномерных элементов: пружинных и демпферных — 1692; элементов распределенной массы — 11364; трехмерных гексаэдральных конечных элементов — 37058; оболочечных конеч-

ных элементов — 299250; дискретных (сфер) элементов — 18380.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При аварийном столкновении грузового локомотива с полувагоном в порожнем и груженом состоянии возникают необратимые деформации каркаса кабины машиниста и кузова полувагона. Как показали результаты моделирования столкновения локомотива с полувагоном в порожнем состоянии, разрушения остекления кабины машиниста не произошло. Каркас кабины деформировался незначительно, ярко выраженные необратимые деформации выявлены у торцевой стенки и боковых стен кузова полувагона при физическом времени столкновения 0,20 с. Одновременно произошел отрыв первой колесной пары второй тележки полувагона (рис. 4).

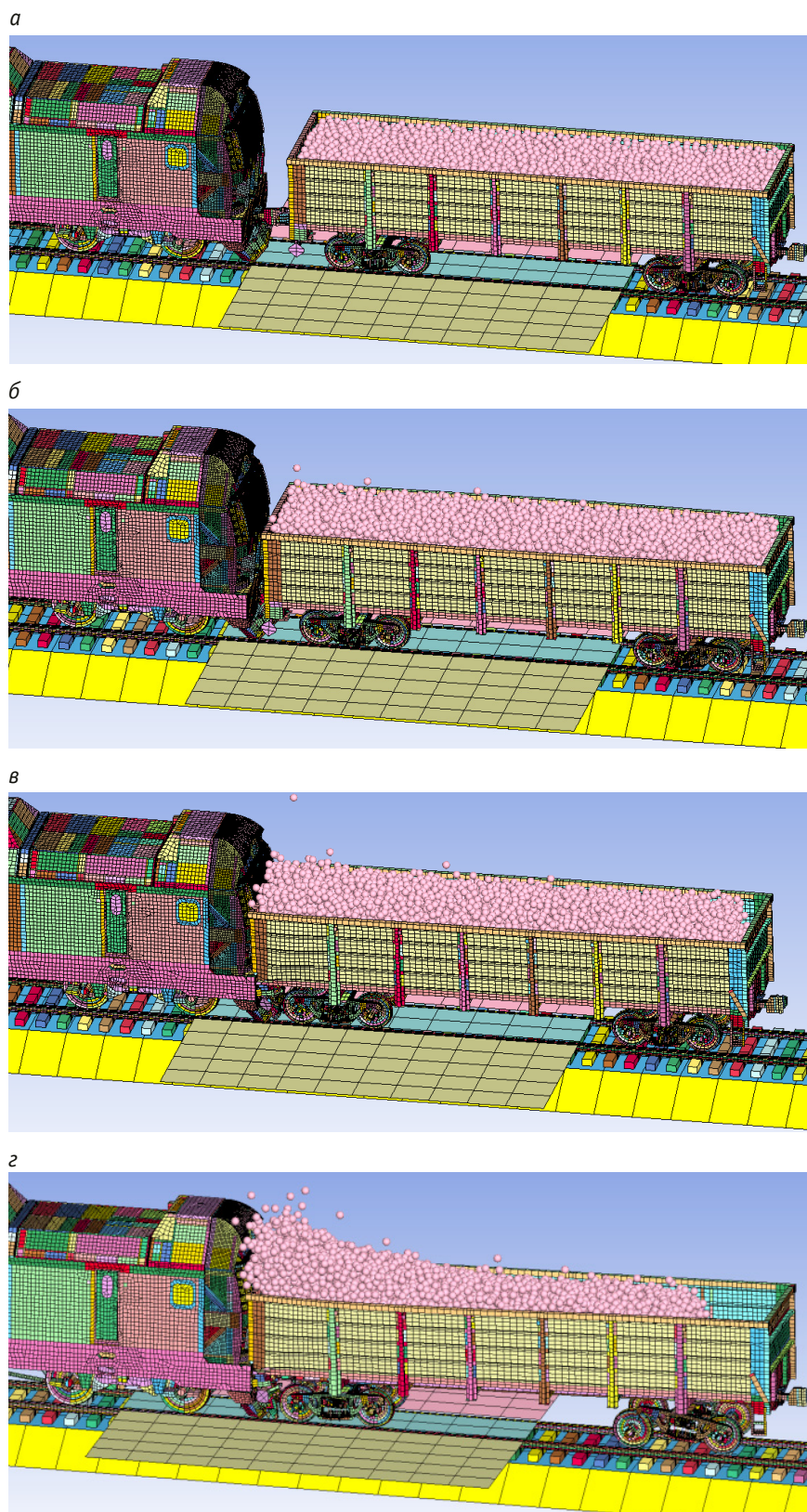


Рис. 5. Временной процесс аварийного столкновения с полувагоном в груженом состоянии:
 а — 0,00 с; б — 0,05 с; в — 0,10 с; г — 0,20 с

В процессе столкновения локомотива с полувагоном в груженом состоянии сыпучий груз переместился в сторону кабины машиниста, произошло выкатывание первой колесной пары второй тележки полувагона (рис. 5). Движение сыпучего груза по истечении времени столкновения 0,20 с вызвало разрушение остекления кабины машиниста (рис. 6).

Поглощение кинетической энергии удара средствами пассивной защиты локомотива при аварийном столкновении с полувагоном составило в порожнем состоянии 0,011 МДж, в груженом — 0,155 МДж. Столь малые значения свидетельствуют о том, что разрушение кабины машиниста практически не происходит. Временной процесс поглощения кинетической энергии устройствами пассивной безопасности представлен на рис. 7.

Максимальное ускорение в местах установки кресел машиниста по результатам численного моделирования аварийного столкновения грузового локомотива с грузовым полувагоном в порожнем и груженом состоянии составило 3,63 и 4,80 g соответственно (рис. 8).

ВЫВОДЫ

Как показало численное моделирование аварийного столкновения локомотива с полувагонами в порожнем и груженом состоянии, каркас кабины машиниста деформировался незначительно. При столкновении с полувагоном в груженом состоянии максимальное значение поглощенной кинетической энергии удара составило 0,155 МДж, изменение ускорений в местах установки кресел машиниста составило 4,80 g, т.е. не превысило 5,00 g. Таким образом, на основании результатов моделирования сделан вывод о работоспособности системы пассивной безопасности локомотива.

Совместное использование метода конечных элементов и метода дискретных элементов позволило оценить перемещение сыпучего груза. Поскольку при аварийном столкновении локомотива с полувагоном в груженом состоянии произошло разрушение остекления кабины машиниста, то для защиты членов локомотивной бригады в таких случаях можно предложить создание пенетрационных стенок, срабатывающих до момента столкновения.

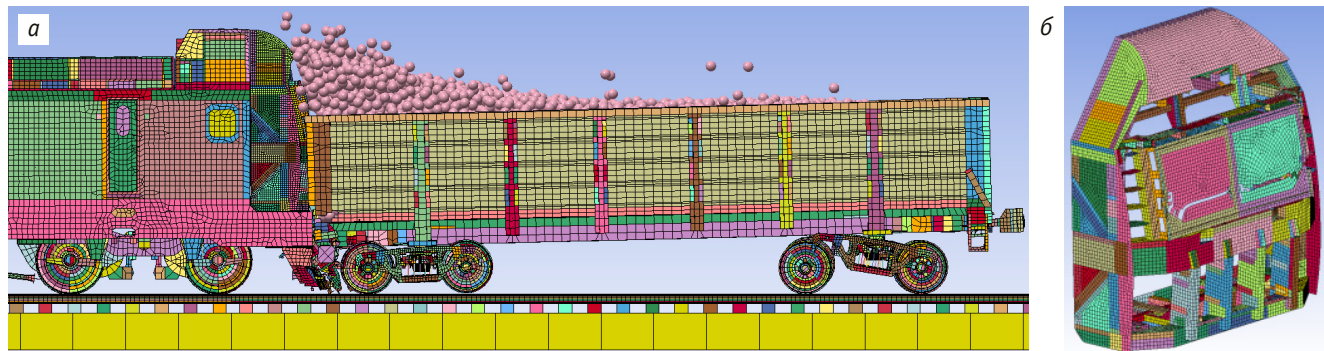


Рис. 6. Перемещение сыпучего груза и разрушение остекления кабины машиниста:
 а — состояние механической системы в момент времени 0,20 с; б — разрушение остекления

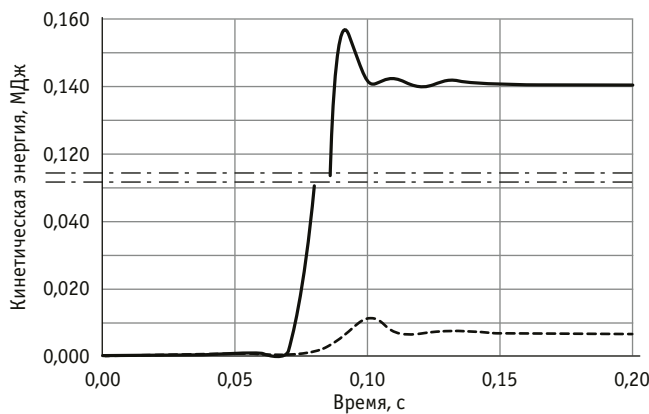


Рис. 7. Временные графики поглощения кинетической энергии удара:

--- порожнее состояние; ——— груженое состояние

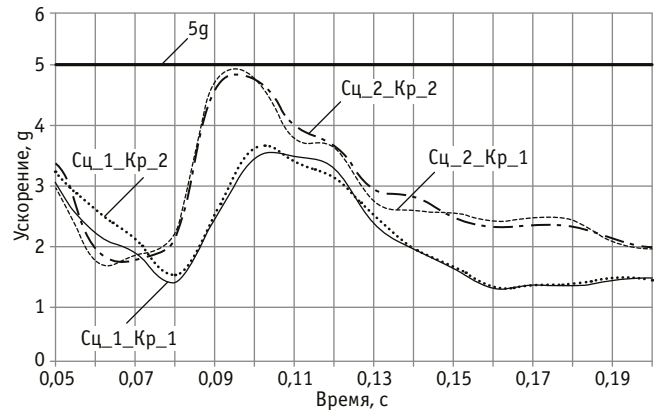


Рис. 8. Графики изменения ускорений в местах установки кресел машиниста:

Сц_1 и Сц_2 — порожний и груженный полувагон;
 Кр_1 и Кр_2 — первое и второе кресла кабины машиниста

Следует отметить, что метод дискретных элементов позволяет смоделировать не только сыпучие материалы, такие как песок (в водонасыщенном состоянии, сухой), бетонная смесь и др., но и жидкости (например, воду). Поэтому даль-

нейшие исследования авторов будут направлены на моделирование аварийных столкновений локомотивов с препятствиями, перевозящими различные виды жидкостей и материалы в сыпучем виде.

Сведения об авторах:

Михаил Владимирович Жуйков, аспирант кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения

Александр Эдуардович Павлюков, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения

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

Authors information:

Mikhail V. Zhuykov, postgraduate student of Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport

Alexander E. Pavlyukov, DSc in Engineering, Professor of Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport

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

Литература

1. Авария на переезде. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1583899&archive=2021.10.25> (дата обращения: 03.02.2024).
2. Два поезда врезались в грузовик с сахарной свеклой между Барановичами и Минском. URL: <https://auto.onliner.by/2017/10/08/dtp-8854> (дата обращения: 03.02.2024).
3. Столкновение грузовых поездов в Челябинской области. URL: <https://ria.ru/20110811/415911253.html> (дата обращения: 03.02.2024).
4. В Забайкалье столкнулись два поезда, с рельсов сошли 14 грузовых вагонов. URL: <https://taishet.bezformata.com/listnews/poezda-s-relsov-soshli-14-gruzovih/126241606/> (дата обращения: 03.02.2024).
5. Емельянов И. Г., Кузнецов А. В., Миронов В. И. Математическая модель, описывающая напряженное состояние кабины газотурбовоза при встрече с препятствием // Транспорт Урала. 2013. № 4 (39). С. 71–74. ISSN 1815-9400.
6. Emel'yanov I. G., Mironov V. I., Kuznetsov A. V. On an approach to the evaluation of the strength of a spatial rod system under impact loading // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2015. Issue 2. Pp. 16–23. ISSN 2410-9908.
7. Емельянов И. Г., Миронов В. И., Кузнецов А. В. Определение области безопасной эксплуатации кабины локомотива // Проблемы безопасности строительных критических инфраструктур (SAFETY2016) : сборник тезисов II международной конференции, Екатеринбург, 26–27 июня 2016 г. Екатеринбург : УрФУ, 2016. С. 94–98.
8. Секулович М. Метод конечных элементов. Москва : Стройиздат, 1993. 664 с.
9. Бате К.-Ю. Методы конечных элементов. Москва : Физматлит, 2010. 1024 с.
10. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures / T. Belytschko, W. K. Liu, B. Moran, Kh. I. Elkhodary : 2nd edition. Wiley, 2014. 834 p.
11. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics : 6th edition. ELSEVIER, 2005, 648 p.
12. Larsson S. Characterization and modeling of rock impact on steel plates : Master's Thesis. Lulea University of Technology, 2014. 86 p.
13. Hiermaier S. Predictive Modeling of Dynamic Processes. Springer Science+Business Media, LLC, 2009. 462 p.
14. Соболевская М. Б., Сирота С. А. Основные положения концепции пассивной защиты скоростного пассажирского поезда при аварийных столкновениях // Техническая механика. 2015. № 1. С. 84–96.
15. Tyrell D. A. A Crush Zone Design for An Existing Passenger Rail Cab Car // *Proceedings of 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, November 5–11, 2005, Orlando, Florida. Pp. 1–10.
16. Study of deformations and energy intensity of the driver's cabin of a freight electric locomotive during emergency collisions based on numerical simulation / M. Zhuykov, A. Pavlyukov, K. Kolyasov, D. Duvanov // *Railway Transport and Technologies (RTT-2021) : International scientific and practical conference*. AIP Conf. Proc. 2624, 020015 (2023). URL: <https://doi.org/10.1063/5.0132278> (дата обращения: 01.03.2024).
17. Livermore Software Technology Corporation (LSTC). LS-DYNA Keyword User's Manual. 2024. Vol. I. 4084 p.
18. Livermore Software Technology Corporation (LSTC). LS-DYNA Keyword User's Manual. 2024. Vol. II. 2153 p.

References

1. Accident at a crossing. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1583899&archive=2021.10.25> (access date: 03.02.2024). (In Russian).
2. Two trains crashed into a truck with sugar beets between Baranovichy and Minsk. URL: <https://auto.onliner.by/2017/10/08/dtp-8854> (access date: 03.02.2024). (In Russian).
3. Collision of two trains in Chelyabinsk Region. URL: <https://ria.ru/20110811/415911253.html> (access date: 03.02.2024). (In Russian).
4. Two trains collapsed in Transbaikalia, 14 freight cars derailed. URL: <https://taishet.bezformata.com/listnews/poezda-s-relsov-soshli-14-gruzovih/126241606/> (access date: 03.02.2024). (In Russian).
5. Emel'yanov I. G., Kuznetsov A. V., Mironov V. I. Mathematical model describing the stressed state of a gas turbine locomotive cabin when encountering an obstacle. *Transport of the Urals*. 2013. No. 4 (39). Pp. 71–74. ISSN 1815-9400. (In Russian).
6. Emel'yanov I. G., Mironov V. I., Kuznetsov A. V. On an approach to the evaluation of the strength of a spatial rod system under impact loading. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2015. Issue 2. Pp. 16–23. ISSN 2410-9908.
7. Emel'yanov I. G., Mironov V. I., Kuznetsov A. V. Determination of the area of safe operation of the locomotive cabin. *Security problems of construction critical infrastructures (SAFETY2016) : collection of abstracts from the International conference*, Ekaterinburg, June 26–27, 2016. Ekaterinburg : UrFU, 2016. Pp. 94–98. (In Russian).
8. Sekulovich M. Finite element method. Moscow : Stroyizdat, 1993. 664 p. (In Russian).
9. Bathe K.-Ju. Finite element methods. Moscow, 2010. 1024 p. (In Russian).
10. Belytschko T., Liu W. K., Moran B., Elkhodary Kh. I. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures : 2nd edition. Wiley, 2014. 834 p.
11. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics : 6th edition. ELSEVIER, 2005, 648 p.
12. Larsson S. Characterization and modeling of rock impact on steel plates : Master's Thesis. Lulea University of Technology, 2014. 86 p.
13. Hiermaier S. Predictive Modeling of Dynamic Processes. Springer Science+Business Media, LLC, 2009. 462 p.
14. Soboлевskaya M. B., Sirota S. A. The basics of the conception of passive protection of a high-speed passenger train under accidental collisions. *Technical mechanics*. 2015. No. 1. Pp. 84–96. (In Russian).
15. Tyrell D. A. A Crush Zone Design for An Existing Passenger Rail Cab Car. *Proceedings of 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, November 5–11, 2005, Orlando, Florida. Pp. 1–10.
16. Zhuykov M., Pavlyukov A., Kolyasov K., Duvanov D. Study of deformations and energy intensity of the driver's cabin of a freight electric locomotive during emergency collisions based on numerical simulation. *Railway Transport and Technologies (RTT-2021) : International scientific and practical conference*. AIP Conf. Proc. 2624, 020015 (2023). URL: <https://doi.org/10.1063/5.0132278> (access date: 01.03.2024).
17. Livermore Software Technology Corporation (LSTC). LS-DYNA Keyword User's Manual. 2024. Vol. I. 4084 p.
18. Livermore Software Technology Corporation (LSTC). LS-DYNA Keyword User's Manual. 2024. Vol. II. 2153 p.

Научная статья
УДК 681.171.5

Диагностика неисправностей тягового электродвигателя электропоезда ЭД9Т методом спектрального анализа тока в обмотке якоря

Игорь Александрович Меншиков¹, Андрей Сергеевич Космодамианский¹,
Сергей Иванович Баташов¹, Андрей Анатольевич Фатеев¹

¹Российская открытая академия транспорта Российского университета транспорта, Москва, Россия

Diagnostics of the defects of the ED9T electric train traction motor with the method of spectral analyses of current in the armature winding

Igor A. Menshikov¹, Andrey S. Kosmodamianskiy¹, Sergey I. Batashov¹, Andrey A. Fateev¹

¹Russian Open Academy of Transport of Russian University of Transport, Moscow, Russia

Аннотация

Представлены результаты исследования в области повышения эффективности функционирования тягового электродвигателя электропоезда ЭД9Т. От надежности тягового электродвигателя электропоезда ЭД9Т и эффективности его использования во многом зависит ритмичная и устойчивая работа железнодорожного транспорта. Наиболее распространенными повреждениями в обмотке якоря тягового электродвигателя электропоезда ЭД9Т являются нарушения условий коммутации якоря, витковые замыкания вследствие повреждения изоляции витков, замыкания обмотки на корпус («землю») и двойные замыкания на землю. Для оперативного выяснения неисправностей обмоток якоря тягового электродвигателя авторами предложен логарифмически спектральный метод диагностики, позволяющий по результатам математической обработки спектрограмм определять повреждения.

Ключевые слова: техническая диагностика, контроль, тяговый электродвигатель, спектральный анализ тока, математическая обработка сигнала

Abstract

The results of the research in the sphere of the efficiency increase of functioning of the traction electric motor of the ED9T electric train have been presented. Smooth and sustainable railway transport operation depends greatly on the reliability of the traction motor of the ED9T electric train and its efficiency of use. The most widespread damages in the armature winding of the traction motor of ED9T electric train are violations of the terms of the armature commutating, interwinding faults because of the damage of the insulation of coil turns, closure of winding on the case («ground») and double closures on the ground. The authors offered a logarithmical spectral method of diagnostics allowing to determine malfunctions on the results of mathematical spectrogram processing for rapid clarification of the faults of the armature windings of the traction electric motor.

Keywords: technical diagnostics, control, traction electric motor, current spectral analyses, mathematical processing of a signal

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-35-40

Одними из ответственных и важных задач технического обслуживания и ремонта электроподвижного состава в моторвагонном депо являются прогнозирование сроков проведения ремонтов и оценка качества их выполнения.

Бортовые интеллектуальные автоматизированные системы диагностирования тяговых электродвигателей (ТЭД) электроподвижного состава позволяют своевременно выявлять опасные отказы межвитковой и главной изоляции обмоток, используя малые выборки, и обеспечивать высокую надежность распознавания дефектов изоляции.

Электромеханические характеристики: ток в цепи якоря, частота вращения, момент вращения и мощность на валу якоря — определяются непосредственно опытным путем при испытании тягового электродвигателя на стенде методом возвратной работы [1–3].

Экспериментально в моторвагонном депо «Отрожка» Юго-Восточной дирекции моторвагонного подвижного состава были исследованы тяговые электродвигатели типа ТЭДЗУ электропоезда переменного тока серии ЭД9Т, которые имеют мощность 220 кВт (рис. 1).

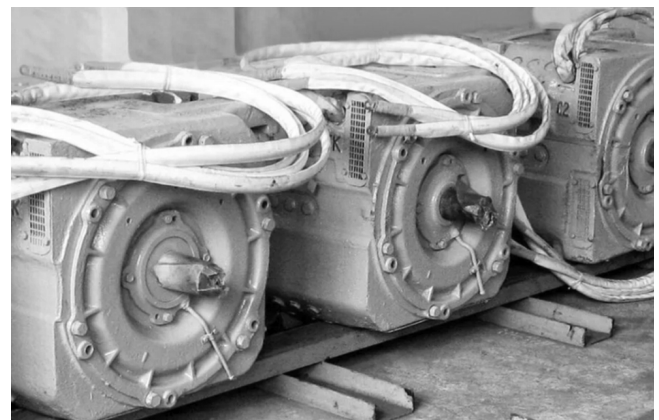


Рис. 1. Тяговый электродвигатель типа ТЭДЗУ



Рис. 2. Подключение осциллографа к измерительному шунту амперметра диагностического стенда



Рис. 3. Пульт управления нагрузочного стенда

В качестве математического аппарата исследования технического состояния тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ авторами было предложено использовать теорию распознавания [2, 4–6].

Экспериментальные исследования в моторвагонном депо проводились на диагностическом стенде. Принцип работы диагностического стенда заключается в том, что испытуемый тяговый электродвигатель вращает другой однопольный тяговый электродвигатель, соединенный с ним и работающий в качестве генератора. Вырабатываемая последним электроэнергия идет на питание испытуемого тягового электродвигателя.

Для получения достоверных электромеханических характеристик двигателей, оценки расхождения характеристик и определения возможности установки разных двигателей на одном моторном вагоне были проведены сравнительные испытания по специальной программе.

В ходе квалификационных испытаний в моторвагонном депо использовали метод взаимной нагрузки двух испытываемых электродвигателей. Проверка проходила при непосредственной нагрузке испытываемого двигателя на постоянно установленную на стенде нагрузочную машину, а в отдельных опытах — по методу взаимной нагрузки двух однопольных машин. В ходе квалификационных экспериментов в моторвагонном депо применяли метод взаимной нагрузки двух испытываемых электродвигателей. При испытаниях с помощью приборов измерялись рабочие характеристики тяговых электродвигателей: частота вращения якоря, холостого и нагрузочного хода, вращающий момент на валу и КПД, а также с использованием цифрового осциллографа исследовались осциллограммы тока в цепи якоря исправных ТЭД и неисправных с нарушением условий коммутации. Подключение осциллографа к измерительному шунту амперметра испытательного стенда показано на рис. 2.

С помощью взаимного нагрузочного стенда (рис. 3) проведены экспериментальные исследования на электродвигателе постоянного тока серии ТЭДЗУ, имеющем следующие технические характеристики: мощность $P = 220$ кВт, напряжение питания постоянного тока $U = 825$ В, номинальная частота вращения вала якоря $n = 870$ об/мин, номинальный ток якоря $I_a = 295$ А.

В результате испытаний исправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ № 480415-Я98395 получены осциллограммы тока в цепи якоря (рис. 4).

С помощью графоаналитического метода осциллограмму тока якоря разбиваем в соответствии с периодом на $n = 8$ частей $\Delta x = \frac{2\pi}{n}$ и интеграл заменяем суммами Δx (рис. 5) [1, 2, 5, 6].

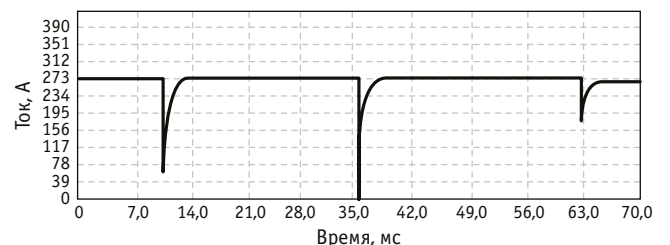


Рис. 4. Осциллограмма тока якоря работоспособного и исправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ

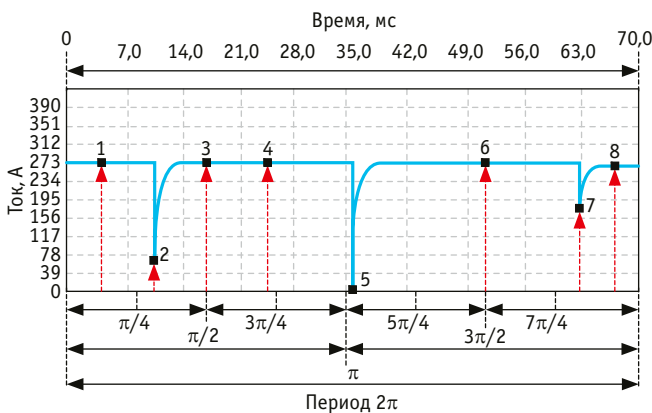


Рис. 5. Разложение осциллограммы тока якоря исправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ в ряд Фурье

Осциллограмму тока якоря разложим в ряд Фурье по формуле

$$I(x) = A_0 + A_1^{//} \cdot \cos(x) + A_3^{//} \cdot \cos(2x) + \cos(3x) + \dots \text{ (табл. 1).}$$

Постоянную составляющую значения тока рассчитаем по формуле

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f_p(x) dx = \frac{1}{2\pi} \sum_{p=1}^{p=n} f_p(x) \Delta x = \frac{1}{2\pi} \sum_{p=1}^n f_p(x) \frac{2\pi}{n},$$

или

$$A_0 = \frac{1}{8} \sum_{p=1}^n f_p(x) = 205,6 A,$$

где p — индекс, значения которого принимаются в диапазоне от 1 до n ; $f_p(x)$ — значение функции тока якоря.

Для определения амплитуды косинусной составляющей k -гармоники воспользуемся формулой

$$A_k^{//} = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^n f_p(x) \cos_p kx,$$

где $\cos_p kx$ — значение функции $f_p(x)$.

Согласно этой формуле амплитуды косинусной составляющей первой, второй, третьей, четвертой и пятой гармоник равны:

$$A_1^{//} = \frac{2}{8} \sum_{p=1}^n f_p(x) \cos_p 1x = 121,9 A;$$

$$A_2^{//} = \frac{2}{8} \sum_{p=1}^n f_p(x) \cos_p 2x = -37,8 A;$$

$$A_3^{//} = \frac{2}{8} \sum_{p=1}^n f_p(x) \cos_p 3x = 60,9 A;$$

$$A_4^{//} = \frac{2}{8} \sum_{p=1}^n f_p(x) \cos_p 4x = 34,1 A;$$

$$A_5^{//} = \frac{2}{8} \sum_{p=1}^n f_p(x) \cos_p 5x = -3,0 A.$$

Осциллограмму тока якоря запишем рядом Фурье:

$$i(\omega t) = 205,6 + 121,9 \cos(\omega t) - 37,8 \cos(2\omega t) + 60,9 \cos(3\omega t) + 34,1 \cos(4\omega t) - 3,0 \cos(5\omega t), \quad (1)$$

где $\omega = 88,96$, $2\omega = 177,9$, $3\omega = 266,9$, $4\omega = 355,8$, $5\omega = 444,8$ — угловая скорость первой, второй, третьей, четвертой и пятой гармоник тока соответственно, рад/с.

Для цифровой обработки полученных осциллограмм тока якоря и выделения диагностических параметров предлагаем использовать логарифмический спектральный анализ:

Таблица 1

Расчет параметров ряда Фурье тока якоря исправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ

Ток, А	Δx , рад	$\cos(\Delta x)$	$\cos(2\Delta x)$	$\cos(3\Delta x)$	$\cos(4\Delta x)$	$\cos(5\Delta x)$
273	0,393	252,2	192,9	104,2	-0,3	-104,9
78	0,982	43,3	-29,9	-76,5	-55,1	15,3
273	1,57	0,2	-273,0	-0,7	273,0	1,1
273	2,356	-193,0	-0,1	193,2	-273,0	192,9
10	3,24	-10,0	9,8	-9,6	9,2	-8,8
273	4,71	-0,7	-273,0	2,0	273,0	-3,3
195	5,49	136,8	-3,0	-141,1	-194,9	-132,4
270	5,99	258,5	224,9	172,1	104,7	28,3
$\Sigma = 1645$	-	$\Sigma = 487,4$	$\Sigma = -151,4$	$\Sigma = 243,7$	$\Sigma = 136,5$	$\Sigma = 11,8$
$A_0 = 205,625$	-	$A_1 = 121,9$	$A_2 = -37,8$	$A_3 = 60,9$	$A_4 = 34,1$	$A_5 = -3,0$

$$C_{lsk}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln[S_I(k\omega)]^2 e^{i\omega t} d\omega, \quad (2)$$

где $S_I(k\omega)$ — спектр тока в цепи обмотки якоря ТЭД, ω — угловая скорость k -й гармоники тока.

Спектр тока якоря ТЭД в виде функции $S_I(k\omega)$, заданный на отрезке $t = 0 \dots t_N$, можно считать периодическим, т.е. $S_I(t \pm nt_N) = S_I(t)$, здесь k — любое целое число, t_N — период Фурье [4, 7]:

$$S_I(k\omega) = \sum_{k=0}^{\infty} (a_k \cos k\omega t), \quad (3)$$

где $a_k = a(k\omega)$ образуют частотный спектр сигнала $S_I(k\omega)$; $\omega = 2\pi/t_N$ — основная угловая скорость тока якоря; k — номер гармоники.

Составляющие спектра тока якоря:

$$a_0 = \frac{1}{t_N} \int_0^{t_N} s(t) dt; \quad a_k = \frac{2}{t_N} \int_0^{t_N} s(t) \cos k\omega t dt, \quad (4)$$

где $S_I(t)$ — аналоговое значение тока в цепи обмотки якоря ТЭД.

На рис. 6 представлена логарифмическая спектрограмма тока якоря исправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ. Цветовая палитра используется для отображения уровня амплитуды логарифмического спектра: темно-синий цвет соответствует минимальной, темно-красный — максимальной амплитуде [2, 4, 5, 8].

Анализируя логарифмическую спектрограмму исправного тягового электродвигателя ТЭДЗУ, делаем вывод, что ТЭД имеет неравномерную частотную логарифмическую спектрограмму.

На рис. 7 представлен псевдоспектр тока якоря исправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ.

Гармоники частот исправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ запишем в виде матрицы комплексных векторов частот:

$$W(f) = 165,78 - 165,78 + 76,0 - 76,0.$$

При неисправном состоянии тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ (например, круговой огонь по коллектору, когда щетки коллекторно-щеточного узла имеют повышенный износ) в цепи обмотки якоря возникает переходный процесс, который сопровождается колебанием магнитного потока в воздушном зазоре и большим размахом амплитуд мгновенного значения тока (рис. 8).

Изображение несинусоидальной кривой осциллограммы тока неисправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ при нарушении условий коммутации можно графически разложить и записать рядом Фурье (рис. 9, табл. 2).

Постоянную составляющую значения тока определим по формуле

$$A_0 = \frac{1}{12} \sum_{p=1}^n f_p(x) = 235,4 \text{ А.}$$

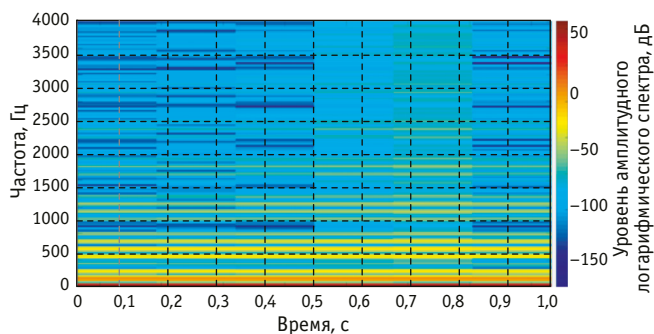


Рис. 6. Логарифмическая спектрограмма тока якоря исправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ

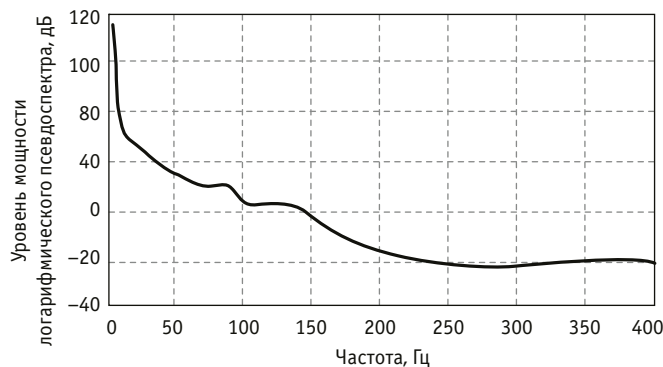


Рис. 7. Псевдоспектр тока в цепи обмотки якоря исправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ

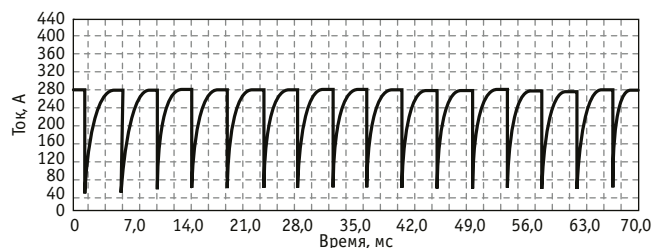


Рис. 8. Осциллограмма тока в обмотке якоря неисправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ

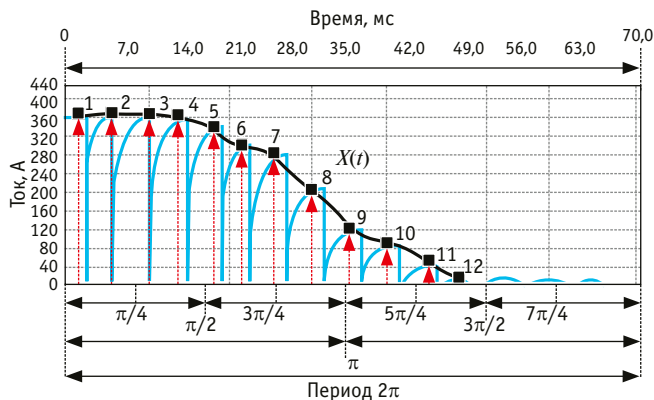


Рис. 9. Разложение осциллограммы тока в цепи якоря неисправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ (круговой огонь по коллектору) в ряд Фурье

Таблица 2

Расчет параметров ряда Фурье тока якоря неисправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ (круговой огонь по коллектору)

Ток, А	Δx , рад	$\cos(\Delta x)$	$\cos(2\Delta x)$	$\cos(3\Delta x)$	$\cos(4\Delta x)$	$\cos(5\Delta x)$
360	0,196	353,1	332,7	299,5	254,9	200,5
365	0,589	303,5	139,7	-71,2	-258,0	-358,0
360	0,981	200,2	-137,3	-352,9	-255,3	68,9
360	1,374	70,4	-332,5	-200,4	254,1	299,8
340	1,767	-66,3	-314,2	188,8	240,6	-282,6
300	1,963	-114,7	-212,3	277,0	0,6	-277,4
280	2,365	-199,7	4,9	192,7	-279,8	206,5
200	2,74	-184,1	138,9	-71,6	-7,1	84,7
120	3,141	-120,0	120,0	-120,0	120,0	-120,0
80	3,73	-66,5	30,7	15,5	-56,4	78,4
40	4,31	-15,7	-27,7	37,4	-1,5	-36,2
20	4,71	0,0	-20,0	0,1	20,0	-0,2
$\Sigma = 2825$	-	$\Sigma = 160,2$	$\Sigma = -277,0$	$\Sigma = 194,9$	$\Sigma = 31,9$	$\Sigma = -135,6$
$A_0 = 235,4$	-	$A_1 = 26,7$	$A_2 = -46,2$	$A_3 = 32,5$	$A_4 = 5,3$	$A_5 = -22,6$

Амплитуды косинусной составляющей первой, второй, третьей, четвертой и пятой гармоник равны:

$$A_1'' = \frac{2}{12} \sum_{p=1}^n f_p(x) \cos_p 1x = 26,7 \text{ А};$$

$$A_2'' = \frac{2}{12} \sum_{p=1}^n f_p(x) \cos_p 2x = -46,2 \text{ А};$$

$$A_3'' = \frac{2}{12} \sum_{p=1}^n f_p(x) \cos_p 3x = 32,5 \text{ А};$$

$$A_4'' = \frac{2}{12} \sum_{p=1}^n f_p(x) \cos_p 4x = 5,3 \text{ А};$$

$$A_5'' = \frac{2}{12} \sum_{p=1}^n f_p(x) \cos_p 5x = -22,6 \text{ А};$$

$$i(\omega t) = 235,4 + 26,7 \cos(\omega t) - 46,2 \cos(2\omega t) + 32,5 \cos(3\omega t) + 5,3 \cos(4\omega t) - 22,6 \cos(5\omega t), \quad (5)$$

где $\omega = 88,96$, $2\omega = 177,92$, $3\omega = 266,88$, $4\omega = 355,84$ и $5\omega = 444,8$ — соответственно угловая скорость первой, второй, третьей, четвертой и пятой гармоник тока, рад/с.

Логарифмическая спектрограмма тока якоря неисправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ в зависимости от времени представлена на рис. 10.

В соответствии с полученной логарифмической спектрограммой обмотки якоря неисправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ можно сделать вывод, что логарифмическая мощность сигнала равномерно распределяется по всей площади

ди спектра тока статора. На рис. 11 представлен график псевдоспектра тока в цепи обмотки якоря неисправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ.

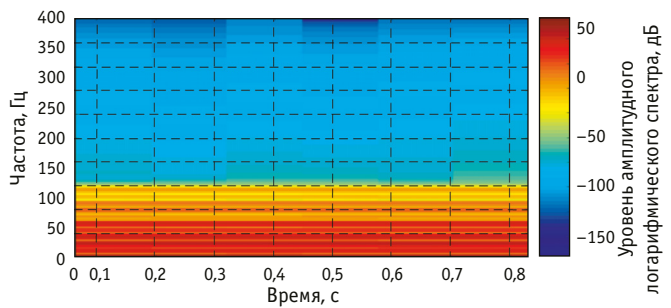


Рис. 10. Логарифмическая спектрограмма тока обмотки якоря неисправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ

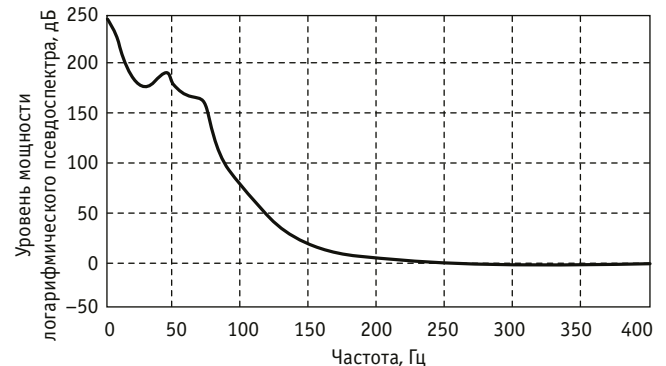


Рис. 11. График псевдоспектра тока в цепи якоря неисправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ

Гармоники частот неисправного тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ запишем в виде матрицы комплексных векторов частот

$$W(f) = 83,87 - 83,87 + 53,51 + 3,46.$$

Как следует из анализа графика псевдоспектра тока якоря тягового электродвигателя типа ТЭДЗУ, исправный ТЭД имеет значение мощности сигнала логарифмического спектра 120 дБ,

Сведения об авторах:

Игорь Александрович Менщиков, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта

Андрей Сергеевич Космодамианский, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта

Сергей Иванович Баташов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта

Андрей Анатольевич Фатеев, преподаватель кафедры «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта

а неисправный — 250 дБ, что указывает на наличие нарушения условий коммутации (круговой огонь по коллектору).

Таким образом, полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований спектрального анализа тока якоря ТЭД позволяют оперативно определять опасные отказы межвитковой изоляции обмоток якоря ТЭД, а также прогнозировать периодичность технического обслуживания и ремонта тяговых электродвигателей электроподвижного состава по фактическому состоянию изоляции обмоток якоря ТЭД.

Authors information:

Igor A. Menschikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Traction Rolling Stock Department, Russian Open Academy of Transport, Russian University of Transport

Andrey S. Kosmodamianskiy, DSc in Engineering, Professor, Head of Traction Rolling Stock Department, Russian Open Academy of Transport, Russian University of Transport

Sergey I. Batashov, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Traction Rolling Stock Department, Russian Open Academy of Transport, Russian University of Transport

Andrey A. Fateev, Lecturer of Traction Rolling Stock Department, Russian Open Academy of Transport, Russian University of Transport

Литература

1. Гольдберг О. Д., Хелемская С. П. Надежность электрических машин. Москва : Академия, 2010. 288 с.
2. Менщиков И. А., Баташов С. И. Кепстральный анализ диагностических параметров электромеханических систем электропоезда переменного тока серии ЭР9Т // Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. № 6. С. 9–13. ISSN 1812-6782.
3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. Москва : Энергосервис, 2003. 368 с.
4. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. Санкт-Петербург : Питер, 2006. 751 с.
5. Менщиков И. А., Баташов С. И. Диагностика аварийных режимов тягового двигателя постоянного тока типа РТ51М электропоезда ЭД9Т // Современные проблемы железнодорожного транспорта : сборник трудов по результатам международной конференции. Москва : РУТ (МИИТ), 2020. С. 136–146.
6. Менщиков И. А., Космодамианский А. С., Баташов С. И. Прогнозирование остаточного ресурса тягового электропривода электропоезда серии ЭД9Т с помощью нечеткого моделирования гибридной нейронной сети // Электроника и электрооборудование транспорта. 2020. № 6. С. 29–35. ISSN 1812-6782.
7. Ануфриев И. Е., Смирнов А. Б., Смирнова Е. Н. MATLAB 7. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. 1104 с.
8. Устройство контроля витковых замыканий в обмотке якоря и индуктора синхронной машины / А. В. Епремян, С. В. Семергей, Н. В. Руденко [и др.] : пат. 2150711 Рос. Федерация. № 99108173/09; заявл. 16.04.1999; опубл. 10.06.2000, Бюл. № 6.

References

1. Golberg O. D., Khelemskaya S. P. Reliability of electric machines. Moscow : Academy, 2010. 288 p. (In Russian).
2. Menschikov I. A., Batashov S. I. Cepstral analysis of diagnostic parameters of electromechanical systems electric ac series ER9T. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2018. No. 6. Pp. 9–13. ISSN 1812-6782. (In Russian).
3. Rules of technical operation of power stations and networks of the Russian Federation. Moscow : Energy service, 2003. 368 p. (In Russian).
4. Sergienko A. B. Digital signal processing. St. Petersburg : Piter, 2006. 751 p. (In Russian).
5. Menschikov I. A., Batashov S. I. Diagnostics of emergency modes of a DC traction motor of the RT51M type of the ED9T electric train. *Modern problems of railway transport : proceedings of International conference*. Moscow : RUT (MIIT), 2020. Pp. 136–146. (In Russian).
6. Menschikov I. A., Kosmodamianskiy A. S., Batashov S. I. Predicting the remaining life of the traction engine electric drive of the ED9M series electric train using fuzzy hybrid modeling neural network. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2020. No. 6. Pp. 29–35. ISSN 1812-6782. (In Russian).
7. Anufriev I. E., Smirnov A. B., Smirnova E. N. MATLAB 7. St. Petersburg : BHV-Petersburg, 2005. 1104 p. (In Russian).
8. Epremyan A. V., Semergey S. V., Rudenko N. V. [et al.]. Device for monitoring loop closures in the armature and inductor winding of a synchronous machine : patent 2150711 Russian Federation. No. 99108173/09; filed 16.04.1999; publ. 10.06.2000, Bulletin No. 6. (In Russian).

Объем статьи 0,57 авторских листа

Научная статья
УДК 621.43.013

Экспериментальные исследования изменения коэффициента избытка воздуха и свободного кислорода в отработавших газах бензинового ДВС

Александр Владимирович Гриценко^{1,2}, Константин Вячеславович Глемба^{1,2}, Александр Владимирович Старунов², Александр Сергеевич Меньшенин², Степан Андреевич Чоккой²

¹Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

²Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия

Experimental studies of changes in the coefficient of excess air and free oxygen in the exhaust gases of a gasoline engine

Alexander V. Gritsenko^{1,2}, Konstantin V. Glemba^{1,2}, Alexander V. Starunov², Alexander S. Menshenin², Stepan A. Chokoy²

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

²South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia

Аннотация

Работа ДВС с бедной или богатой смесью характеризуется снижением эффективности каталитического нейтрализатора и ростом степени износа элементов систем топливоподачи, зажигания и антитоксичных систем. Современные тенденции смещения работы ДВС в область бедных смесей приводят к повышению выбросов NO и CO₂ и ухудшению процесса сгорания. В статье теоретически определены и выбраны диагностические параметры — свободный кислород и коэффициент избытка воздуха. Установлена закономерность изменения параметра O₂ при 20 % и 40 % открытия дроссельной заслонки от величины сопротивления выпускного тракта и зазора свечи зажигания при варьировании времени длительности впрыска. Экспериментальный контроль параметра λ показал тренд его максимума в зоне минимальных длительностей впрыска с постепенным снижением λ-характеристики при увеличении длительности впрыска вплоть до границ работоспособности ДВС. Установлено, что рост сопротивления выпускного тракта приводит к эквидистантному смещению характеристик λ вверх (в зону больших значений λ) при одновременном существенном уменьшении диапазона работоспособности ДВС.

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

Abstract

The operation of the internal combustion engine in areas of poor and rich mixture is characterized by a decrease in the efficiency of the catalytic converter and increase in the degree of wear of the system of elements fuel supply systems, ignition and antitoxic systems. Current trends of shifting the operation of the internal combustion engine to the area of poor mixtures. leads to increased emissions of NO and CO₂, deterioration of the combustion process. The diagnostic parameters, which are free oxygen and the excess air coefficient, were theoretically determined and selected for the research. The regularity of the change in O₂ at 20 % and 40 % of the throttle opening from the resistance of the exhaust tract and the spark plug gap with varying injection time duration has been established. Experimental control of the parameter λ showed a trend of having a maximum in the zone of injection durations, and a gradual decrease when shifting to the zone of long injection durations to the limits of the efficiency of the internal combustion engine. An increase in the resistance of the exhaust tract leads to an equidistant shift of the characteristics λ upwards into the zone of large values λ while significantly reducing the range of the engine performance.

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

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-41-48

АКТУАЛЬНОСТЬ

Локальные выбросы вредных веществ автотранспорта — CO, CO₂, NO, O₂, CH, твердых частиц (PM) — в наибольшей степени загрязняют окружающую среду и влияют на групповые выбросы отработавших газов (ОГ) [1–3] (к которым относятся и выбросы отдельных автомобилей, и суммарные выбросы всего автомобильного парка в регионе или стране). В табл. 1 представлены общие данные выбросов автомобильных двигателей на различных участках дорожной инфраструктуры в Москве [4–6]. Анализ табл. 1 позволяет сделать следующие выводы: наибольшее количество выбросов ОГ возникает при затрудненном движении на автомагистралях; при наличии нескольких полос и правильной организации дорожного движения такие проблемы отсутствуют; в городской черте автомобильные заторы приводят к намного более значительным выбросам и их накоплению.

Таблица 1

Выбросы на различных участках дорожной инфраструктуры в Москве, мг/м³ [4–6]

Участок дороги	CO	NO	Сажа
Автомагистраль	2,3	< 0,03	< 0,025
Автомагистраль, значительная пробка	6,8	0,444	< 0,025
Автомагистраль, интенсивное движение	5,7	0,276	0,041
Оживленный переулок	1,9	< 0,03	0,027
Дорога около лесопарковой зоны	1,7	< 0,03	< 0,025
Двор	< 1,5	< 0,03	< 0,025

Таблица 2

Для различных компонентов ОГ автомобильных двигателей установлены предельно допустимые концентрации (ПДК) (табл. 2).

Нормативные данные, приведенные в табл. 2, разработаны на основе научных исследований и определяют максимально допустимый уровень выбросов вредных веществ в атмосферу, который не должен превышать [7–9]. Для снижения выбросов основных токсичных компонентов бензинового двигателя используются следующие технические решения, алгоритмы и приемы [10, 11]: работа в зоне бедных и сверхбедных смесей; непосредственный впрыск топлива; активная регулировка высоты подъема и фаз впускных и выпускных клапанов газораспределения; сверхмощное искрообразование и надежное воспламенение любой топливно-воздушной смеси (ТВС) в минимальные промежутки времени; интенсификация поступления свежего воздушного заряда и турбонаддув для дополнительной подачи свежего воздушного заряда; топливные многокомпонентные карты; использование искусственного интеллекта для обеспечения адаптивности и дискретного управления системами и элементами ДВС; антитоксичные системы со сложным управлением по обратной связи; системы встроенного контроля, диагностирования и прогнозирования технического состояния [12]; высококачественные топливно-смазочные материалы; гибридные технологии при комбинации ДВС с другими типами двигателей [13]; использование электромобилей и беспилотного транспорта [14, 15]. Все эти разработки требуют существенных материальных затрат.

В некоторых литературных источниках рассматриваются такие показатели эффективности работы каталитических нейтрализаторов, как коэффициент преобразования отдельного компонента ОГ, скорость регенерации каталитического нейтрализатора после работы в самых сложных условиях, конкретные значения концентрации компонентов отработавших газов [16–18]. С этой точки зрения большой интерес представляет контроль в выпускном тракте реальных значений компонентов ОГ как до, так и после каталитического нейтрализатора [19–22].

ПДК токсичных компонентов автотранспорта

Вещество	ПДК, мг/м	
	max (разовая)	min (разовая)
Монооксид углерода	5	3
Оксид азота	0,6	0,06
Углеводороды	5	1,5
Сажа	0,15	0,05
Бенз(а)пирен	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$

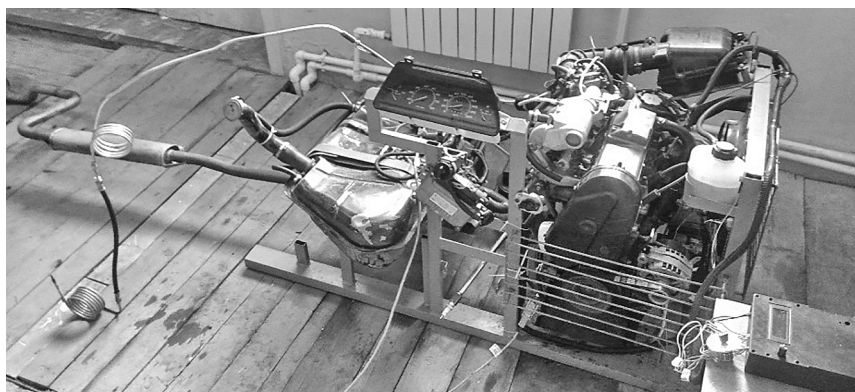


Рис. 1. Вид испытательного стенда

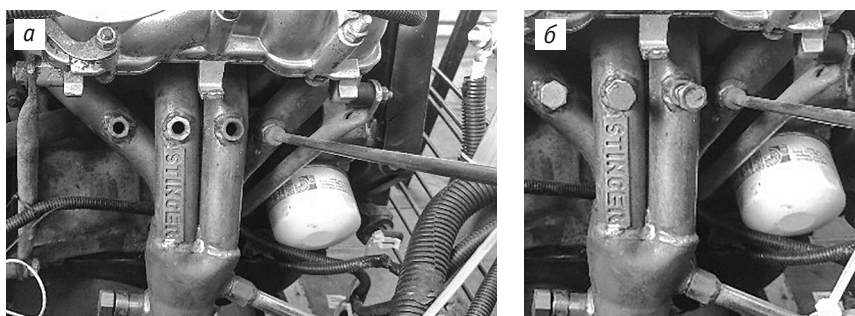


Рис. 2. Элементы модернизированного выпускного коллектора:

а — коллектор с присоединительными резьбовыми гайками и удлинителем зонда газоанализатора; б — заглушки в резьбовых гайках

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для экспериментальных исследований была разработана методика, включающая изготовление испытательного стенда, выбор средств контроля и подготовку эксперимента [10, 12]. Испытательный стенд включал в себя металлическую раму с размещенным на ней бензиновым двигателем ВАЗ 21114-70(72) — Евро 4 (рис. 1).

Двигатель ВАЗ 21114-70(72) выбран как наиболее распространенный при установке на автомобили ВАЗ, его тех-

нические характеристики: мощность при $n = 5200 \text{ мин}^{-1}$ — 60 кВт; 4-цилиндровый и 8-клапанный механизм газораспределения; диаметр цилиндра и ход поршня — 82 и 75,6 мм соответственно; рабочий объем цилиндров — 1,6 л. Двигатель управляется при помощи микропроцессорной системы по принципу распределенного впрыска и управляется бензином 95-й марки. В системе зажигания используются свечи марок BPR 6ES(NGK) или отечественный аналог А17ДВРМ. Для контроля параметров ток-

сичности использовался многокомпонентный газоанализатор «Инфракар МЗ-7», позволяющий контролировать четыре параметра ОГ (O_2 , CO_2 , CO и CH) и, кроме того, обеспечивающий измерение частоты вращения коленчатого вала ДВС.

Выпускной коллектор двигателя ВАЗ 21114-70(72) был модернизирован, чтобы подсоединить зонд газоанализатора (рис. 2а). В крайний правый патрубок выпускного коллектора вкручен удлинитель, а в продолжение удлинителя дополнительно установлен змеевик (см. рис. 1) для охлаждения нагретых ОГ, после которого присоединен зонд газоанализатора. Отверстия на патрубках выпускного коллектора, не используемые для контроля ОГ, герметизировались заглушками (рис. 2б).

В выпускном тракте испытательного стенда установлены элементы искусственного сопротивления в виде муфты с 13 сменными шайбами (рис. 3). В экспериментах использовались три варьируемых величины сопротивления выпускного тракта диаметрами 8, 17 и 26 мм с вариацией внутри диапазона 9 мм. Минимальный диаметр 8 мм выбран исходя из предельно возможного ограничения по уровню работоспособности, так как дальнейшее уменьшение сечения выпуска не позволяет поддерживать даже самое низкое значение частоты вращения коленчатого вала ДВС.

Помимо сопротивления на выпуске, в испытаниях изменяли рабочий зазор свечи зажигания. На этапе предварительной подготовки к эксперименту рабочий зазор плавно варьировали от номинального значения 1,1 мм до минимально возможного, при котором возникают нарушения воспламеняемости ТВС. При зазоре 0,3 мм были обнаружены граничные условия перехода, когда существенно нарушалась бесперебойность искробразования. Поэтому в эксперименте были приняты три значения зазора свечи зажигания (0,3, 0,7 и 1,1 мм) с вариацией внутри диапазона 0,4 мм. Для контроля параметров токсичности отработавших газов выбран многокомпонентный газоанализатор «Инфракар МЗ-7», который подсоединялся к подготовленным индивидуальным точкам. В качестве нагрузочного устройства для обеспечения тестовых режимов и условий эксперимента использовали диагностическое приборное средство — догрузатель ДБД-4 [10], который может полностью или частично отключать цилиндры воздействием на импульсы топливоподачи, а также корректировать импульсы впрыска независимо от электронного блока управления ДВС. Общий вид прибора ДБД-4, подсоединенного к электрическим цепям электромагнитных форсунок и аккумулятора, представлен на рис. 4. Догружатель ДБД-4 позволяет дискретно корректировать длительность впрыска электромагнитных форсунок, при этом минимальное значение корректировки составляет 0,1 мс как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения. Кроме того, у прибора ДБД-4 есть функция синхронного отключения импульсов топливоподачи для тестового нагружения ДВС.

При проведении исследований также использовался мотор-тестер МТ-10 (рис. 5) для параллельного (дублирующего) контроля коэффициента избытка воздуха, частоты вращения коленчатого вала, степени открытия дроссельной заслонки, расхода воздуха и топлива. Регистрируемые данные сопоставлялись с экспериментальными, которые снимались с многокомпонентного газоанализатора «Инфракар МЗ-7».

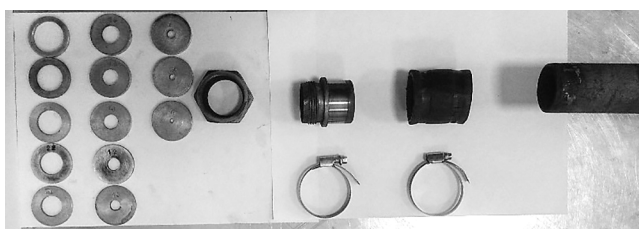


Рис. 3. Муфта со сменными шайбами (выпускной тракт двигателя)

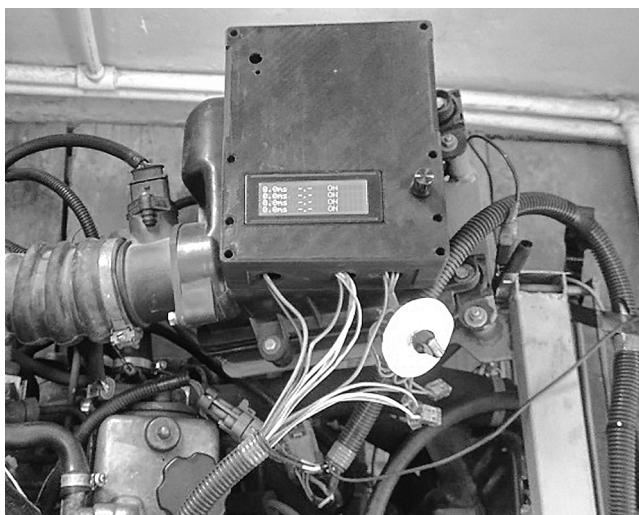


Рис. 4. Общий вид подключенного исследовательского прибора ДБД-4

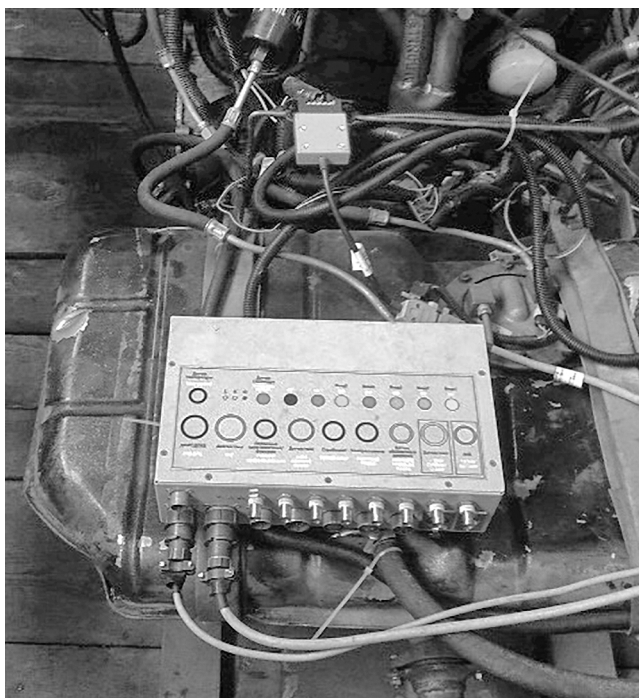


Рис. 5. Приборное средство для параллельного (дублирующего) контроля

В экспериментах исследовались две взаимосвязи: изменение параметра токсичности ОГ ($O_2, \%$) при смещении длительности впрыска (t , мс) и изменение коэффициента избытка воздуха λ в зависимости от длительности впрыска (t , мс). При этом были заданы два фиксированных значения положения дроссельной заслонки — 20 и 40 % открытия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ АНАЛИЗ

В качестве программ анализа, обработки и визуализации полученных данных приняты Microsoft Excel и SigmaPlot.

Рассмотрим изменение O_2 при степени открытия дроссельной заслонки 20 %. Как видно из рис. 6, на котором представлены данные 9 экспериментов, между номинальными и предельными значениями компонента O_2 наблюдаются существенные различия. Так, начальная точка отсчета, при которой двигатель работает исправно, — это длительность впрыска $t = 7,5$ мс, когда обеспечивается максимальное значение O_2 на уровне 6–6,5 %, что соответствует области переобедненной смеси. По мере увеличения длительности впрыска до 9,5 мс происходит резкое снижение O_2 до минимального уровня, далее все графики идут полого, практически параллельно горизонтальной оси, и заканчиваются зоной предела работоспособности при $t = 16$ мс. Это зона возможного переобогащения ТВС, в которой прекращается устойчивая работа цилиндров и происходит остановка ДВС.

Из рис. 6 видно, что при $R = 17$ –26 мм графики сначала резко снижаются под большим углом наклона, фактически прижимаясь к вертикальной оси, а после, с точки излома

при $t = 9,5$ мс, наоборот, почти приближаются к горизонтальной оси. По достижении $R = 8$ мм начало графиков смещается правее в зону больших длительностей впрыска ($t = 8,4$ –8,5 мс). Далее графики резко падают вниз до критической точки перелома, соответствующей $t = 9,5$ –9,6 мс. Затем все графики идут параллельно оси изменения длительности впрыска, не опускаясь ниже $O_2 = 1,3$ %. Предельный диапазон в зоне максимальных длительностей впрыска уменьшается до 14 мс. Таким образом, предельное техническое состояние элементов систем выпуска, в частности каталитических нейтрализаторов, можно определить с высокой точностью, причем резкое снижение содержания O_2 в ОГ наблюдается с эквивалентного сечения $R = 17$ мм до предельного значения $R = 8$ мм, меньше которого уже невозможна работа двигателя.

Теперь рассмотрим результаты эксперимента при степени открытия дроссельной заслонки на уровне 40 % (рис. 7).

Анализ рис. 7 показывает, что степень открытия дроссельной заслонки влияет на точку начала и конца характеристики O_2 . Так, видно, что начало характеристики соответствует $t = 8,5$ мс. Это зона, которую можно назвать зоной наибольшего обеднения ТВС. Крайней левой точке соответствует наибольшее значение концентрации O_2 , которое лежит в пределах 5,2–5,7 %. По сравнению с рис. 6 зависимости на рис. 7 расположены более плавно, точка перегиба происходит при $t = 11,0$ –12,5 мс, после чего графики O_2 идут параллельно оси времени впрыска t и заканчиваются при больших значениях t по сравнению с теми, что показаны на рис. 6. Предел ограничения по обогащению смеси наступает при $t = 18$ мс.

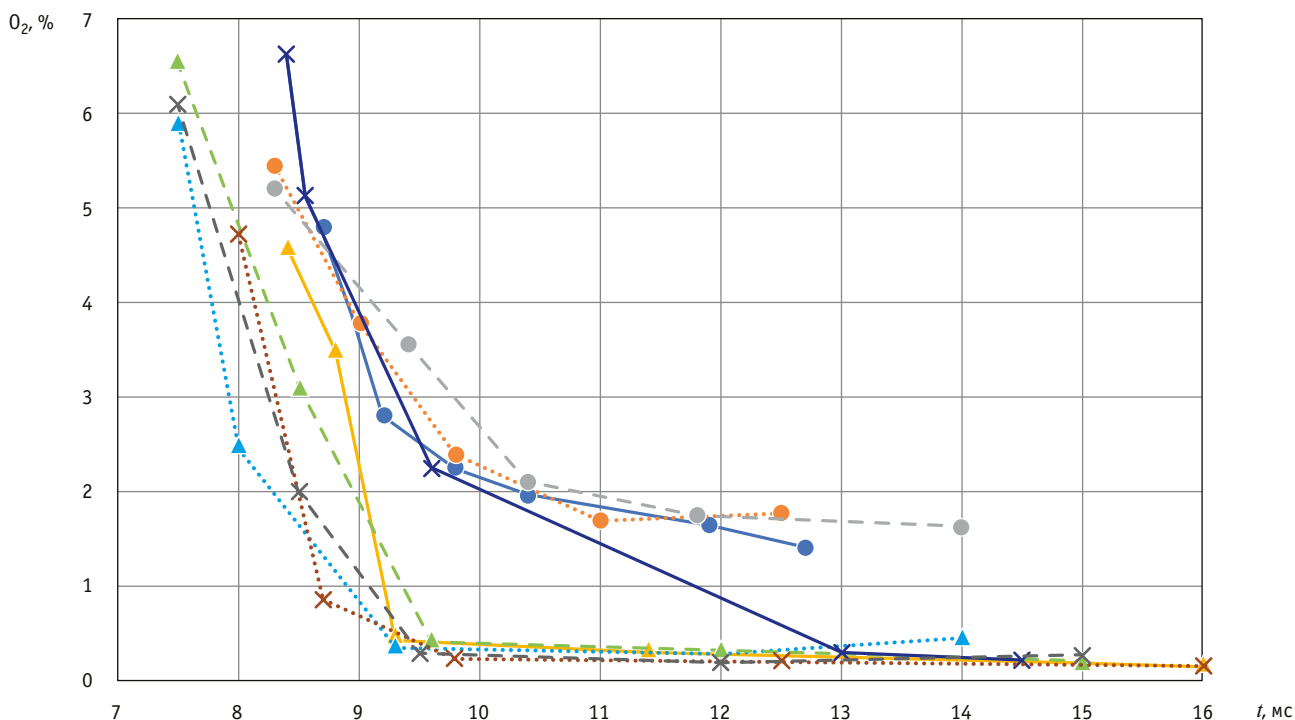


Рис. 6. Зависимость O_2 от длительности впрыска t (в условиях фиксированного положения дроссельной заслонки 20 %) при изменении сопротивления выпускного тракта R (8, 17 и 26 мм) и зазора свечи зажигания z (0,3, 0,7 и 1,1 мм):

● — 8_0.3; ● — 8_0.7; ● — 8_1.1; ▲ — 17_0.3; ▲ — 17_0.7; ▲ — 17_1.1; × — 26_0.3; × — 26_0.7; × — 26_1.1

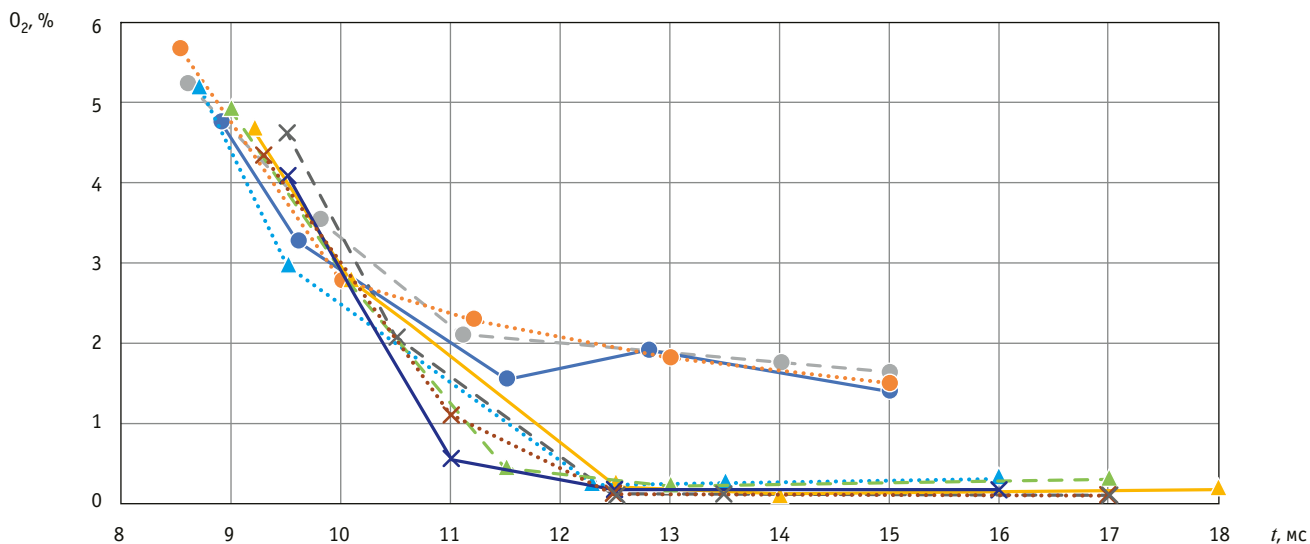


Рис. 7. Зависимость O_2 от длительности впрыска t (в условиях фиксированном положении дроссельной заслонки 40 %) при изменении параметров сопротивления выпускного тракта R (8, 17, 26 мм) и зазора свечи зажигания z (0,3, 0,7 и 1,1 мм):

● — 8_0.3; ● — 8_0.7; ● — 8_1.1; ▲ — 17_0.3; ▲ — 17_0.7; ▲ — 17_1.1; × — 26_0.3; × — 26_0.7; × — 26_1.1

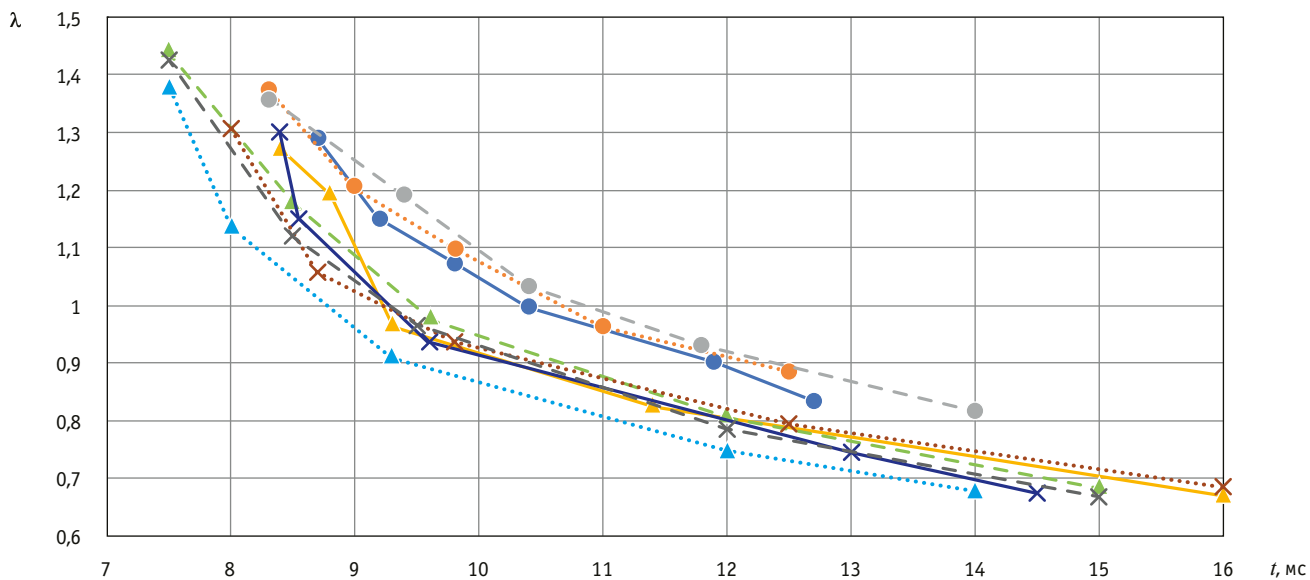


Рис. 8. Исследование взаимосвязи параметра λ и длительности впрыска варьированием сопротивления выпускного тракта ($R = 8, 17$ и 26 мм) и зазоров свечей зажигания ($z = 0,3, 0,7$ и $1,1$ мм) при степени открытия дроссельной заслонки 20 %:

● — 8_0.3; ● — 8_0.7; ● — 8_1.1; ▲ — 17_0.3; ▲ — 17_0.7; ▲ — 17_1.1; × — 26_0.3; × — 26_0.7; × — 26_1.1

Из общей серии отдельно выделяются зависимости при $R = 8$ мм. Как видно из рис. 7, их начало совпадает с остальными графиками, после чего эти три графика обнаруживают точку перегиба в зоне $t = 11$ мс, и потом тренд снижения O_2 идет гораздо выше характеристик, зафиксированных при эталонных и рабочих вариантах сопротивления выпускного тракта. Значения O_2 не опускаются ниже 1,4 %, в то время как при допустимом техническом состоянии системы выпуска O_2 понижается до 0,2 % и далее. В то же время граница переобогащения ТВС наблюдается гораздо раньше — при $t = 15$ мс, после чего работа ДВС невозможна.

Таким образом, можно сделать вывод о высокой чувствительности параметра O_2 к изменению сопротивления выпускного тракта при тестовом контроле в зоне $t = 12,5-15$ мс. На каждый миллиметр уменьшения сечения выпускного тракта прирост O_2 составляет 0,07 %.

Для исследования взаимосвязи параметра λ с длительностью впрыска необходимо рассмотреть совмещенные серии характеристик при варьировании входных параметров — сопротивления выпускного тракта и зазоров свечей зажигания. Анализ характеристик, представленных на рис. 8, указывает на ниспадающий тренд изменения λ -регулирующего с зоны

переобогащенных смесей при малых длительностях в зону переобогащенных смесей при больших длительностях впрыска. Например, максимальное значение λ достигает уровня 1,44, что является пределом работоспособности для двигателей, в которых реализован впрыск до впускного клапана. В зоне $\lambda = 1,4-1,45$ наступает предел, выше которого для данного типа двигателя подняться невозможно. Однако с увеличением длительности впрыска с 7,5 до 9,5–9,7 мс наблюдается довольно резкое квадратичное снижение параметра λ . После этого происходит плавное уменьшение λ до значения 0,66, при котором наступает предел работоспособности по уровню обогащения ТВС. Для данного типа двигателя с впрыском во впускной коллектор предел переобогащения находится на уровне $\lambda = 0,65-0,66$.

На рис. 8 четко прослеживается тренд смещения вверх и правее характеристики λ при увеличении эквивалентного сопротивления в системе выпуска ДВС. Так, при $R = 8$ мм пределы длительности впрыска уменьшаются до 8,3–12,7 мс с небольшим варьированием в сторону переобогащения смеси (до $t = 14$ мс при $z = 1,1$ мм). То есть эталонные свечи зажигания могут работать в зонах переобогащенной смеси, чего нельзя сказать о свечах зажигания с минимальным зазором. Анализ характеристик при $R = 17$ мм и $R = 26$ мм показывает на идентичные пределы изменения λ , где четкой взаимосвязи между параметром λ и длительностью впрыска не прослеживается. То есть это говорит о том, что при варьировании сопротивления в выпускной системе в пределах 17–26 мм диапазон регулирования по параметру λ фактически не изменяется. Эквивалентное сечение выпускного тракта $R = 17$ мм довольно существенно отстоит от предельного значения R на выпуске, которое в зависимости от типа двигателя может находиться на уровне 6–12 мм.

Анализ данных, представленных на рис. 8, дает основание сделать вывод о возможности достоверного контроля

сопротивления выпускного тракта и технического состояния свечей зажигания при эксплуатации автомобиля в режиме работы двигателя вплоть до предельных значений оборотов коленвала за счет непрерывного мониторинга значений λ -характеристики.

Рассмотрим и проанализируем λ -характеристики при изменении угла открытия дроссельной заслонки до 40 % (рис. 9). Остальные значения входных параметров остаются неизменными, однако прибором ДБД-4 можно варьировать рабочий диапазон длительности впрыска до предельных границ работоспособности для данного режима. Из рис. 9 видно, что все показания сгруппированы в тесном поле данных независимо от того, какие изменения входных параметров заданы в экспериментах. Это говорит о том, что при значительных степенях открытия дроссельной заслонки режимы непригодны для разделения неисправностей системы выпуска и системы зажигания. Кроме того, анализ рис. 9 показывает на уменьшение начального диапазона λ по сравнению с данными, представленными на рис. 8. Так, из рис. 9 видно, что максимум λ достигается при $t = 8,5$ мс и составляет 1,37, а на рис. 8 наибольшее значение λ наблюдается при $t = 7,5$ мс, составляя 1,44. В то же время увеличение угла открытия дроссельной заслонки смещает пределы регулирования в зону больших длительностей впрыска до 17–18 мс, но это не приводит к понижению диапазона исследования параметра λ ниже значения 0,7.

Таким образом, высокая чувствительность контроля параметра λ может быть обеспечена при небольших степенях открытия дроссельной заслонки, например 15–20 %, что существенно расширяет диапазон λ -регулирования, а также границы диапазона работоспособности. В то же время большие значения степени открытия дроссельной заслонки не дают весомых различий, поэтому не могут быть пригодны для идентификации неисправностей системы выпуска и системы зажигания.

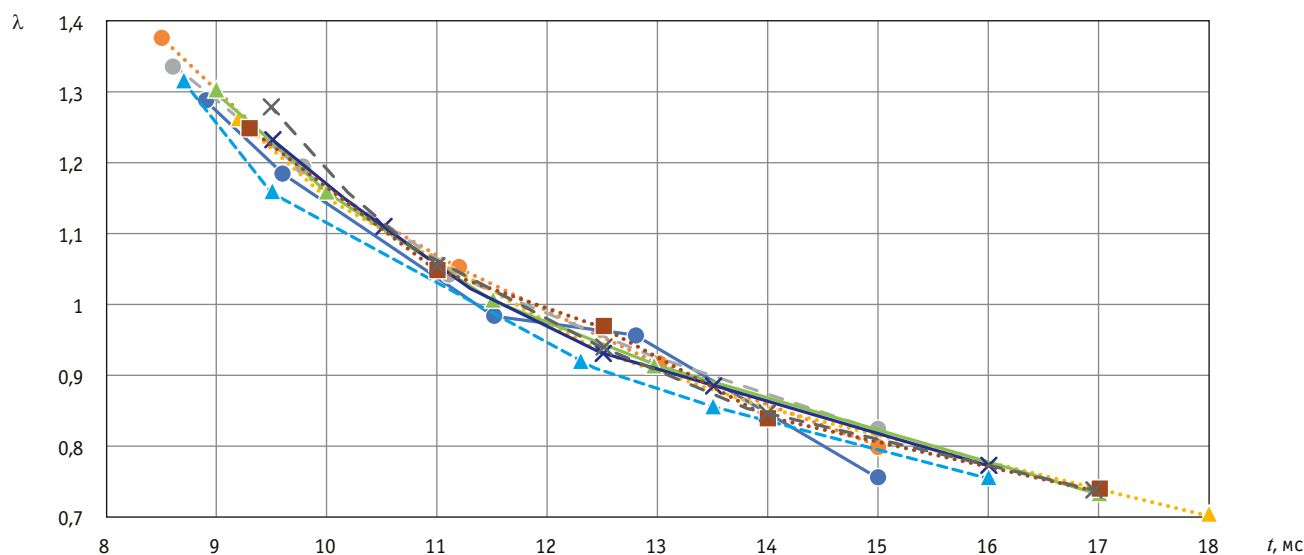


Рис. 9. Исследование взаимосвязи параметра λ от длительности впрыска варьированием сопротивления выпускного тракта ($R = 8, 17$ и 26 мм) и зазоров свечей зажигания ($z = 0,3, 0,7$ и $1,1$ мм) при степени открытия дроссельной заслонки 40 %:

● — 8_0.3; ● — 8_0.7; ● — 8_1.1; ● — 17_0.3; ▲ — 17_0.7; ▲ — 17_1.1; ✕ — 26_0.3; ■ — 26_0.7; ✕ — 26_1.1

ВЫВОДЫ

Разработана установка для проведения экспериментальных исследований с имитацией сопротивления выпускного тракта в пределах от 8 до 26 мм (шаг 9 мм) и свечей зажигания с зазором от 0,3 до 1,1 мм (шаг 0,4 мм).

Установлена закономерность изменения параметра токсичности отработавших газов O_2 при 20 %-м открытии дроссельной заслонки от сопротивления выпускного тракта и зазора свечи зажигания при варьировании времени длительности впрыска. Повышение сопротивле-

ния на выпуске до 8 мм смещает характеристики O_2 вправо при одновременном уменьшении границ работоспособности ДВС. При 40 %-м открытии дроссельной заслонки рост сопротивления выпускного тракта приводит к значительному увеличению параметра O_2 в зоне большей длительности впрыска.

Экспериментальный контроль параметра λ в зависимости от сопротивления выпускного тракта и зазора свечи зажигания показывает тренд наличия максимума в зоне длительностей впрыска и постепенного уменьшения при смещении

в зону больших длительностей впрыска до границ работоспособности ДВС. Рост сопротивления выпускного тракта до 8 мм приводит к эквидистантному смещению характеристик λ вверх в зону больших значений λ при одновременном существенном сокращении диапазона работоспособности ДВС. Контроль параметра λ при степени открытия дроссельной заслонки 40 % показал единую направленность λ -характеристик. Однако рост сопротивления выпускного тракта до 8 мм значительно снижает диапазон работоспособности ДВС.

Сведения об авторах:

Александр Владимирович Гриценко, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), профессор кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного аграрного университета

Константин Вячеславович Глемба, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), доцент кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка и технология и механизация животноводства» Южно-Уральского государственного аграрного университета

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

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

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

Authors information:

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

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

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

Alexander S. Menshenin, postgraduate student of Technical Service of Machinery, Equipment and Life Safety Department, South Ural State Agrarian University

Stepan A. Chokoy, postgraduate student of Technical Service of Machinery, Equipment and Life Safety Department, South Ural State Agrarian University

Литература

1. Pereda-Ayo B., González-Velasco J. R. NO_x Storage and Reduction for Diesel Engine Exhaust Aftertreatment // *Diesel Engine — Combustion, Emissions and Condition Monitoring*. 2013. Pp. 161–196. <http://dx.doi.org/10.5772/55729>.
2. Халиуллин Ф. Х., Амиров А. М. Методика оценки экологических показателей ДВС мобильных машин при неустановившихся режимах работы // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2011. Т. 6. № 4 (22). С. 102–104. ISSN 2073-0462.
3. Жданок С. А., Васильев Г. М., Мигун А. Н. Теплофизические и кинетические процессы в системах снижения токсичности отработавших газов энергетических установок. Минск : Беларуская навука, 2014. 371 с.
4. Давлетова Н. Х. Автотранспорт как глобальный источник загрязнения атмосферного воздуха // *Современные наукоемкие технологии*. 2005. № 4. С. 90. ISSN 1812-7320.

References

1. Pereda-Ayo B., González-Velasco J. R. NO_x Storage and Reduction for Diesel Engine Exhaust Aftertreatment. *Diesel Engine — Combustion, Emissions and Condition Monitoring*. 2013. Pp. 161–196. <http://dx.doi.org/10.5772/55729>.
2. Khaliullin F. H., Amirov A. M. Evaluation methods of environmental ice performance of mobile machines at transient operation. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2011. Vol. 6. No. 4 (22). Pp. 102–104. ISSN 2073-0462. (In Russian).
3. Zhdanok S. A., Vasilyev G. M., Migun A. N. Thermophysical and kinetic processes in systems for reducing the toxicity of exhaust gases of power plants. Minsk : Belarusian science, 2014. 371 p. (In Russian).
4. Davletova N. Kh. Motor transport as a global source of atmospheric air. *Up-to-date high-tech technologies*. 2005. No. 4. P. 90. ISSN 1812-7320. (In Russian).

5. Бондаренко Е. В., Гончаров А. А., Федотов А. М. Научные аспекты транспортной ноосферы // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2017. № 11. С. 4–7. ISSN 2077-7175.
6. Assessment of the City Air Basin Pollution Using a Calculation and Instrumental Technique / I. F. Suleimanov, G. V. Mavrin, D. A. Kharlyamov [et al.] // Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017. Vol. 9. No. 1S. Pp. 1360–1372.
7. Козлов А. В., Теренченко А. С., Васильев А. В. Анализ экологических требований «Евро-6» к автомобильным двигателям // Журнал автомобильных инженеров. 2017. № 3 (104). С. 40–46. ISSN 2073-9133.
8. Экономическая непривлекательность принятия стандарта Евро-6 для Российской Федерации / О. Г. Феоктистов, Е. С. Короткова, Е. П. Усольцева, А. А. Касумова // Экономика и предпринимательство. 2017. № 11 (88). С. 121–127. ISSN 1999-2300.
9. Коротких Ю. С. Экологический стандарт Евро-6 в Европе и России // Управление рисками в АПК. 2016. № 1 (5). С. 34–40. ISSN 2413-6573.
10. Gritsenko A. V., Shepelev V. D., Shepeleva E. V. Optimizing Consumption of Gas Fuel Using Static Method of Tuning Automobile Gas-Cylinder Equipment // Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering ICIE 2018 : Lecture notes in mechanical engineering : Springer International Publishing, 2019. Pp. 2163–2173.
11. Goncharov A. A., Bondarenko E. V., Krasnoshtanov S. Yu. Theoretical aspects of diagnostics of car as mechatronic system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment. Tomsk : Institute of Physics Publishing. 2018. Vol. 327. Issue 4.
12. Бондаренко Е. В., Гончаров А. А., Горлатов С. Е. Методологический подход к созданию многоуровневой адаптивной технологии диагностирования электронных систем автомобилей // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 10 (129). С. 163–168. ISSN 1814-6465.
13. Comparing Fuel Consumption and Emission Levels of Hybrid Powertrain Configurations and a Conventional Powertrain in Varied Drive Cycles and Degree of Hybridization / W. U. Maddumage, K. Y. Abeyasighe, M. Perera [et al.] // Science and Technique. 2020. Vol. 19. No. 1. Pp. 20–33.
14. Гайдук С. В., Мирошниченко Е. В., Петула А. С. Мировые тенденции развития электротранспорта // Энергетические установки и технологии. 2023. Т. 9. № 1. С. 108–114. ISSN 2413-5526.
15. Фашкиев Х. А. Рынок электромобилей — рост стабилен // Маркетинг в России и за рубежом. 2023. № 2. С. 92–102. ISSN 1028-5849.
16. Исаенко П. В., Исаенко В. Д. К расчету гидравлического сопротивления очистителя-нейтрализатора для систем выпуска отработавших газов машин автотранспортного комплекса // Вестник ТГАСУ. 2006. № 1 (12). С. 95–106. ISSN 1607-1859.
17. Лешаков И. А., Кравченко И. Н., Ерофеев М. Н. Математическая модель расчета основных параметров каталитических нейтрализаторов // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 5. С. 76–80. ISSN 1812-7320.
18. Самуэль Б. С. Метод определения скорости химических реакций в процессах нейтрализации отработавших газов // Известия МГТУ «МАМИ». 2012. Т. 6. № 2-2. С. 266–270. ISSN 2074-0530.
19. Lozhkin V., Lozhkina O. Catalytic Converter with Storage Device of Exhaust Gas Heat for City Bus // Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 20. Pp. 412–417.
20. Третьяк Л. Н., Бондаренко Е. В., Вольнов А. С. Совершенствование конструкции нейтрализаторов отработавших газов двигателей внутреннего сгорания // Автомобильная промышленность. 2018. № 2. С. 11–15. ISSN 0005-2345.
21. Исследование экологичности бензинового автомобиля путем анализа состава отработавших газов перед антиоксидантной системой / А. В. Гриценко, К. В. Глемба, А. С. Меньшенин, С. А. Чоккой // Транспорт Урала. 2023. № 4 (79). С. 72–82. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-72-82.
22. Теоретические исследования изменения коэффициента избытка воздуха и свободного кислорода в отработавших газах автомобиля / А. В. Гриценко, К. В. Глемба, А. В. Старунов, А. С. Меньшенин, С. А. Чоккой // Транспорт Урала. 2024. № 1(80). С. 48–54. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-48-54.
5. Bondarenko E. V., Goncharov A. A., Fedotov A. M. Scientific aspects of the transport noosphere. *Intellect. Innovations. Investments*. 2017. No. 11. Pp. 4–7. ISSN 2077-7175. (In Russian).
6. Suleimanov I. F., Mavrin G. V., Kharlyamov D. A. [et al.]. Assessment of the City Air Basin Pollution Using a Calculation and Instrumental Technique. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2017. Vol. 9. No. 1S. Pp. 1360–1372.
7. Kozlov A. V., Terenchenko A. S., Vasilyev A. V. Analysis of the Euro-6 environmental requirements to vehicle. *Journal of Automotive Engineers*. 2017. No. 3 (104). Pp. 40–46. ISSN 2073-9133. (In Russian).
8. Feoktistov O. G., Korotkova E. S., Usol'tseva E. P., Kasumova A. A. Economic unattractiveness of the adoption of the Euro-6 standard for the Russian. *Journal of Economy and entrepreneurship*. 2017. No. 11 (88). Pp. 121–127. ISSN 1999-2300. (In Russian).
9. Korotkikh Yu. S. Environmental standard of Euro-6 in Europe and Russia. *Agricultural Risk Management*. 2016. No. 1 (5). Pp. 34–40. ISSN 2413-6573. (In Russian).
10. Gritsenko A. V., Shepelev V. D., Shepeleva E. V. Optimizing Consumption of Gas Fuel Using Static Method of Tuning Automobile Gas-Cylinder Equipment. *Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering ICIE 2018 : Lecture notes in mechanical engineering* : Springer International Publishing, 2019. Pp. 2163–2173.
11. Goncharov A. A., Bondarenko E. V., Krasnoshtanov S. Yu. Theoretical aspects of diagnostics of car as mechatronic system. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment*. Tomsk : Institute of Physics Publishing. 2018. Vol. 327. Issue 4.
12. Bondarenko E. V., Goncharov A. A., Gorlatov S. E. The methodological approach to creation of multilevel adaptive technology of diagnosing of electronic systems of cars. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2011. No. 10 (129). Pp. 163–168. ISSN 1814-6465. (In Russian).
13. Maddumage W. U., Abeyasighe K. Y., Perera M. [et al.]. Comparing Fuel Consumption and Emission Levels of Hybrid Powertrain Configurations and a Conventional Powertrain in Varied Drive Cycles and Degree of Hybridization. *Science and Technique*. 2020. Vol. 19. No. 1. Pp. 20–33.
14. Gayduk S. V., Miroshnichenko E. V., Petula A. S. Global trends in the development of electric transport. *Power plants and Technologies*. 2023. Vol. 9. No. 1. Pp. 108–114. ISSN 2413-5526. (In Russian).
15. Fashkiev Kh. A. Market of electric vehicles — stable growth. *Journal of Marketing in Russia and Abroad*. 2023. No. 2. Pp. 92–102. ISSN 1028-5849. (In Russian).
16. Isaenko P. V., Isaenko V. D. Calculation of the hydraulic resistance of the cleaner-neutralizer for exhaust systems of vehicles of the motor transport complex. *Journal of Construction and Architecture*. 2006. No. 1 (12). Pp. 95–106. ISSN 1607-1859. (In Russian).
17. Leshakov I. A., Kravchenko I. N., Erofeev M. N. A mathematical model to calculate the main parameters of catalytic converters. *Modern high technologies*. 2013. No. 5. Pp. 76–80. ISSN 1812-7320. (In Russian).
18. Samuel B. S. Method of chemical reactions rate detection in the processes of neutralization of exhaust gases. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2012. Vol. 6. No. 2-2. Pp. 266–270. ISSN 2074-0530. (In Russian).
19. Lozhkin V., Lozhkina O. Catalytic Converter with Storage Device of Exhaust Gas Heat for City Bus. *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 20. Pp. 412–417.
20. Tretyak L. N., Bondarenko E. V., Vol'nov A. S. Improvement of the design of exhaust gas neutralizers of internal combustion engines. *AT*. 2018. No. 2. Pp. 11–15. ISSN 0005-2345. (In Russian).
21. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Menshenin A. S., Chokoy S. A. Study of the environmental friendliness of a gasoline car by analyzing the composition of exhaust gases before the anti-toxic system. *Transport of the Urals*. 2023. No. 4 (79). Pp. 72–82. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-72-82. (In Russian).
22. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Starunov A. V., Menshenin A. S., Chokoy S. A. Theoretical studies into the changes in the coefficient of excess air and free oxygen in the exhaust gases of the car. *Transport of the Urals*. 2024. No. 1 (80). Pp. 48–54. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-48-54. (In Russian).

Научная статья
УДК 62-144.3

Особенности нестационарных тепломеханических процессов в выпускном коллекторе автомобильного поршневого двигателя размерности 8,2/7,1

Леонид Валерьевич Плотников¹, Олег Вячеславович Комаров¹, Данил Алексеевич Давыдов¹, Дмитрий Николаевич Красильников¹, Владислав Александрович Шурупов¹

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Features of non-stationary thermal mechanical processes in the exhaust manifold of an automobile piston engine of size 8.2/7.1

Leonid V. Plotnikov¹, Oleg V. Komarov¹, Danil A. Davydov¹, Dmitriy N. Krasilnikov¹, Vladislav A. Shurupov¹

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

В статье представлены экспериментальные данные, полученные при изучении нестационарной газодинамики и интенсивности теплоотдачи потока в выпускной системе автомобильного поршневого двигателя для разных начальных условий. Исследования проводились на экспериментальном стенде, имитирующем процесс выпуска в поршневом двигателе. Давление на выпуске (в цилиндре) изменялось от 0,05 до 0,2 МПа, частота вращения коленчатого вала — от 600 до 3000 мин⁻¹. Для определения газодинамических, расходных и теплообменных характеристик потока в выпускной системе использовался метод тепловой анемометрии. Получены данные о мгновенных значениях скорости и локальной теплоотдачи потока в выпускной системе для разных граничных условий. Проанализировано влияние величины давления на выпуске на расход газа через выпускную систему и уровень теплоотдачи. Также представлен спектральный анализ изменения местной скорости потока в выпускной системе. Полученные закономерности могут применяться для уточнения инженерных методик расчета выпускной системы и для верификации математических моделей процессов газообмена в автомобильных поршневых двигателях.

Ключевые слова: автомобильный поршневой мотор, выпускная система, нестационарные процессы, газодинамика и теплоотдача, спектр скорости, расход газа

Abstract

The purpose of this work was to obtain experimental data on unsteady gas dynamics and the intensity of heat transfer of the flow in the exhaust system of an automobile piston engine for different initial conditions. The research was carried out on an experimental stand simulating the exhaust process in a piston engine in dynamics. The pressure at the outlet (in the cylinder) varied from 0.05 to 0.2 MPa, the speed of rotation of the crankshaft — from 600 to 3000 min⁻¹. The method of thermal anemometry was used to determine the gas dynamic, flow and heat exchange characteristics of the flow in the exhaust system. Data on the instantaneous values of the velocity and local heat transfer of the flow in the exhaust system for different boundary conditions are presented in the article. The effect of the outlet pressure on the gas flow through the exhaust system and the level of heat transfer was analyzed. The spectral analysis of changes in the local flow velocity in the exhaust system is additionally presented in the article. The obtained patterns are useful in the applied aspect for clarifying engineering methods for calculating the exhaust system and for verifying mathematical models of gas exchange processes in automotive piston engines.

Keywords: automotive piston engine, exhaust system, non-stationary processes, gas dynamics and heat transfer, speed spectrum, gas consumption

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-49-55

ВВЕДЕНИЕ

Поршневой двигатель внутреннего сгорания (ПДВС) остается популярным и незаменимым преобразователем энергии для многих отраслей жизнедеятельности человека (таких как автомобильный и железнодорожный транспорт, энергетика, авиация и др.) [1]. Поэтому ученые и специалисты постоянно ищут способы повышения эффективности, надежности и экологичности ПДВС. Определяющим фактором для совершенствования ПДВС служит качество процесса очистки цилиндра от отработавших газов (такт выпуска) [2]. Такт выпуска — нестационарный, динамичный и сложный физический процесс, влияющий на температурные напряжения в выпускном тракте, на КПД двигателя и турбокомпрессора, а также на экологические показатели. Поэтому для создания математических моделей (цифровых двойников), проектирования ПДВС с перспективными параметрами необходимы дальнейшие исследования процесса очистки цилиндра и достоверные экспериментальные данные о мгновенной локальной теплоотдаче в выпускной трубе (ВыпТ).

Рассмотрим основные научно-технические направления в области процессов газообмена в поршневых двигателях. Одно из них — разработка высокоэффективных математических моделей процесса выпуска в ПДВС [3–6]. Например, Takeshita A. с коллегами предложили оригинальную математическую модель процессов газообмена, которая существенно снижает время, необходимое для расчетов [3]. Karabulut H. и его соавторы создали математическую модель процессов впуска и выпуска с детальным описанием всех физических явлений, характерных для поршневых двигателей [4], подобную разработку предложил Kong K.-J. [5]. Основные цели рассматриваемых математических моделей — повышение точности прогнозирования газодинамических и расходных характеристик потоков в системах газообмена, снижение временных ресурсов на выполнение моделирования и ускорение процесса проектирования ПДВС.

Данные о нестационарных теплообменных характеристиках потоков в процессе выпуска особенно актуальны при проектировании систем турбонаддува для поршневых двигателей [7–9]. Так, Yang M. и его соавторы предложили методику выбора элементов турбокомпрессора на основе исследования тепловой энергии выпускных газов [7]. Ramkumar J. с коллегами спроектировали оригинальную систему выпуска для одноцилиндрового дизеля с турбонаддувом [8]. Газодинамические эффекты и уровень теплообмена в выпускной системе также во многом определяют конструкцию (изгибы, отложения, сопротивление) и качество систем очистки (нейтрализации) отработавших газов в поршневых двигателях [10, 11]. Соответственно создание эффективных систем очистки отработавших газов и перспективных двигателей с турбокомпрессором возможно только при наличии достоверных данных о процессе выпуска. При этом данные о нестационарной газодинамике в процессе выпуска также важны для оценки гидродинамического сопротивления выпускной системы и эксплуатационных показателей всего ПДВС [12, 13]. Например, Dziubak T. с коллегами установили, что высокие значения гидравлического сопротивления в выпускном коллекторе приводят к росту удельного расхода топлива почти на 5 % и падению мощности двигателя до 10 % по сравнению с базовой системой выпуска [12]. Подобные результаты получили Huang L. и его соавторы [13].

Проводятся исследования по оптимизации конструкции выпускной системы для повышения эффективности ПДВС [14–16]. В частности, Song Y. с коллегами выбирали оптимальный диаметр впускных и выпускных труб для поршневого двигателя на основе машинного обучения и алгоритмов искусственного интеллекта [14]. Li B. с соавторами определяли оптимальный диаметр впускных и выпускных каналов в головке цилиндров при помощи математического моделирования [15]. Также выполняются исследования по созданию оригинальных конструкций выпускных систем для двигателей специального назначения [17, 18]. Lee C.-Y. и Tu L.-F. показали, что комплексная модернизация и настройка выпускной системы позволяет повысить КПД двига-

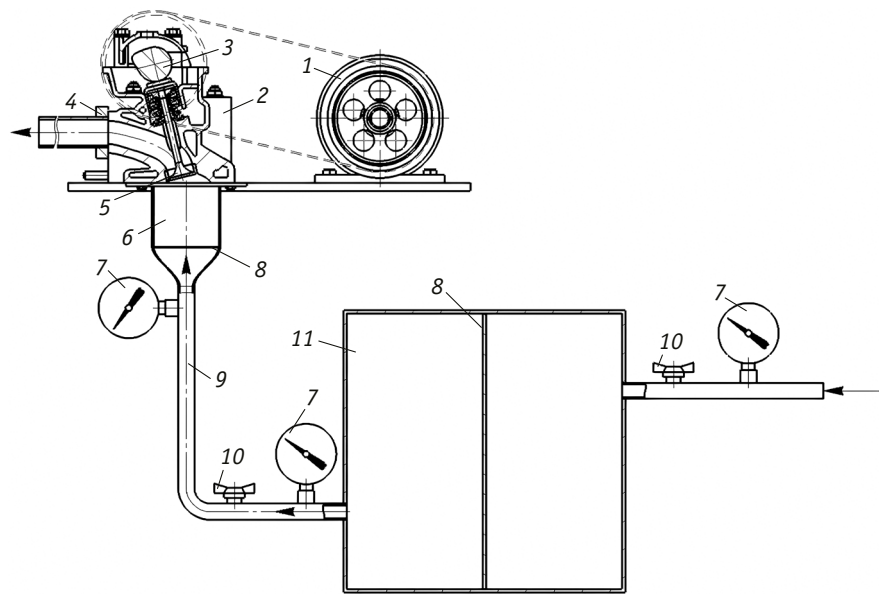


Рис. 1. Функциональная схема экспериментального стенда для исследования нестационарных процессов в выпускной системе:

- 1 — электрический мотор с возможностью регулирования скорости вращения вала;
 - 2 — головка цилиндров; 3 — распределительный вал; 4 — выпускная труба;
 - 5 — выпускной клапан; 6 — цилиндрическая полость; 7 — манометр;
 - 8 — выравнивающая решетка; 9 — соединительный трубопровод;
 - 10 — запорный клапан; 11 — резервуар для стабилизации потока
- (стрелками показано ориентировочное направление движения потока газа)

теля вплоть до 12 % по сравнению с базовой конструкцией [17].

Цель нашего исследования заключалась в получении экспериментальных данных о нестационарной газодинамике и локальной теплоотдаче потока в выпускной системе поршневого двигателя при разных начальных условиях — разных значениях давления в цилиндре и разных частотах вращения коленвала для верификации математических моделей процессов газообмена в ПДВС.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Исследование особенностей процесса выпуска в ПДВС выполнено на основе экспериментального подхода на лабораторном стенде, оснащённом современной измерительной системой. Оценка влияния граничных условий в ВыПТ на нестационарную газодинамику и интенсивность теплоотдачи пульсирующих потоков проводилась на натурной модели ПДВС (рис. 1). Экспериментальный стенд оборудован головкой цилиндров со всеми элементами (клапаном, пружинами, рас-

предвалом, крышками и т.д.) от двигателя автомобиля ВАЗ 1111. Фазы газораспределения и подъем клапанов (9,8 мм) установки соответствовали таковым для данного автомобильного двигателя. Распределительный вал приводился во вращение от асинхронного электродвигателя (мощность 3 кВт). Частота вращения регулировалась преобразователем частоты (фирма АBB) в интервале от 300 до 1500 мин⁻¹, что соответствует частоте вращения коленвала n от 600 до 3000 мин⁻¹.

В ходе проведения опытов мгновенные значения местной скорости w_x и локального коэффициента теплоотдачи (ЛКТ) α_x потока в ВыПТ потока измерялись на основе метода тепловой анемометрии с использованием термоанемометра постоянной температуры и соответствующих ниточных датчиков. Чувствительный элемент (нить) датчиков имел диаметр 5 мкм и длину около 4 мм. Чувствительный элемент датчика для измерения w_x размещался примерно по оси трубы перпендикулярно направлению потока, а нить датчика для измерения α_x — на поверхности трубы на специальной подложке также перпендикулярно на-

правлению потока. Метод определения ЛКТ подробнее описан в статье [19]. Аналоговые сигналы с термоанемометра поступали в аналого-цифровой преобразователь, а далее в компьютер для анализа и обработки в специализированном программном комплексе.

Частота вращения распредвала и условное положение коленвала, в частности положение поршня в верхней (ВМТ) и нижней (НМТ) мертвых точках, измерялись бесконтактным тахометром.

Конфигурация рабочего участка выпускной системы экспериментального стенда и места установки датчиков для измерения мгновенных значений скорости и ЛКТ нестационарного потока показаны на рис. 2.

В данном случае ВыпТ представляла собой прямолинейный канал с круглым поперечным сечением длиной 400 мм и внутренним диаметром 30 мм. Такая конфигурация выбрана исходя из того, что различного рода повороты, изгибы и другие элементы вносят дополнительные возмущения и затрудняют исследования. В трубе сделаны три контрольных сечения для установки датчиков термоанемометра на расстояниях 20, 140 и 340 мм от выпускного окна в головке блока цилиндров¹.

Рабочей средой в опытах был воздух с температурой 22–24 °С. Исследования проводились для различных постоянных избыточных давлений на выпуске p_{ex} (от 0,05 до 0,2 МПа). Среднее избыточное давление контролировалось манометром и регулировалось вентилем (см. рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимости местной скорости потока w_x и ЛКТ α_x от угла поворота коленвала φ для избыточного давления на выпуске $p_{ex} = 0,05$ МПа и для разных n представлены на рис. 3. При этом использование на рис. 3а, б неравномерной шкалы с функциями $w_x = f(\varphi)$ и $\alpha_x = f(\varphi)$ обусловлено нелинейной тарировочной кривой термоанемометра.

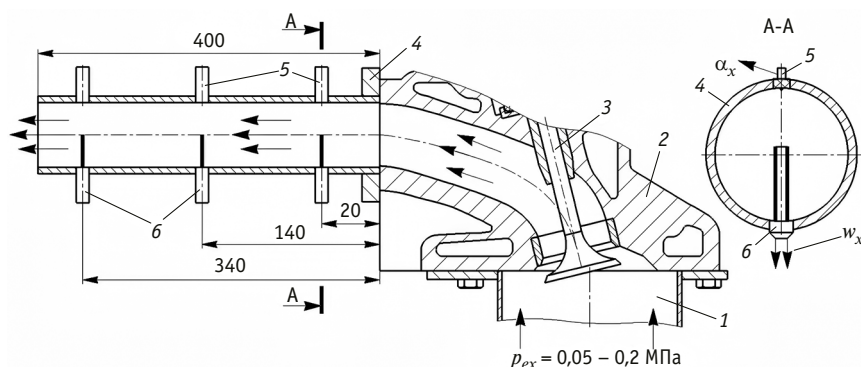


Рис. 2. Конфигурация выпускной системы и места установки датчиков:
1 — цилиндрическая полость; 2 — головка блока цилиндров; 3 — выпускной клапан;
4 — выпускная труба; 5 — тепловой датчик для измерения ЛКТ;
6 — тепловой датчик для определения местной скорости потока воздуха (стрелками показано ориентировочное направление движения потока газа)

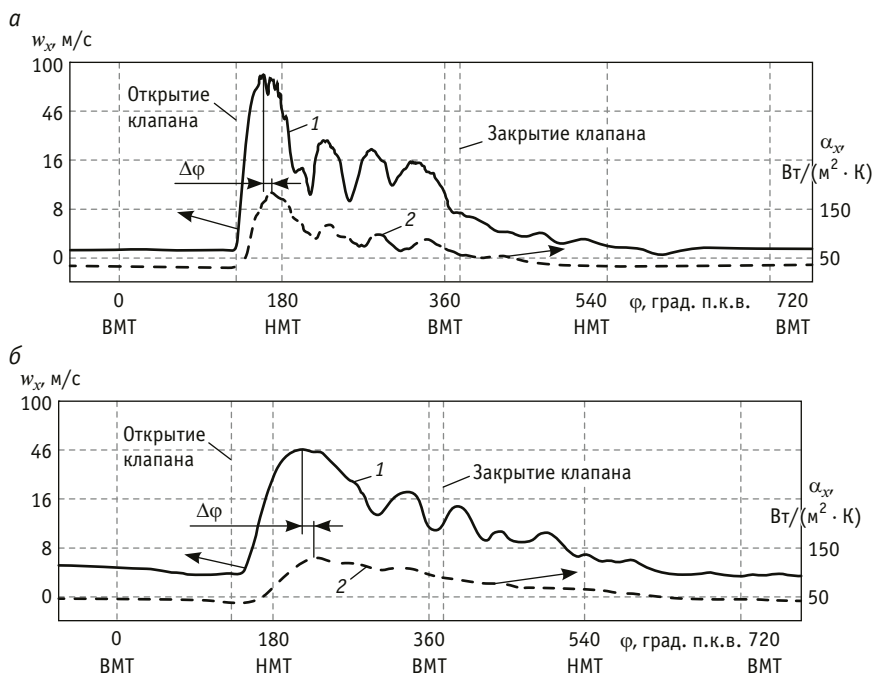


Рис. 3. Зависимости местной скорости потока w_x (1) и ЛКТ α_x (2) от угла поворота коленвала φ в выпускной трубе для давления $p_{ex} = 0,05$ МПа при частотах вращения вала:
а — $n = 600$ мин⁻¹; б — $n = 3000$ мин⁻¹

Определение газодинамических условий теплоотдачи в ВыпТ показало, что пульсации и флуктуации скорости потока воздуха наиболее выражены на низких частотах вращения коленвала при всех значениях p_{ex} (см. рис. 3а). Следует отметить, что противоположный эффект наблюдался во впускной трубе ПДВС [20]: визуально колебания скорости потока воздуха по мере увеличения частоты вращения коленвала были более выражены.

После закрытия выпускного клапана скорость потока воздуха не становится равной нулю и наблюдались некоторые флуктуации скорости. Схожий эффект обнаружен для процесса впуска, где скорость потока воздуха после закрытия клапана также не обращалась в ноль [20]. Это объясняется возвратно-поступательным движением потоков в системах газообмена поршневых двигателей.

Влияние газодинамических факторов проявлялось в динамике интенсив-

¹В статье экспериментальные данные приводятся для контрольного сечения на расстоянии 140 мм.

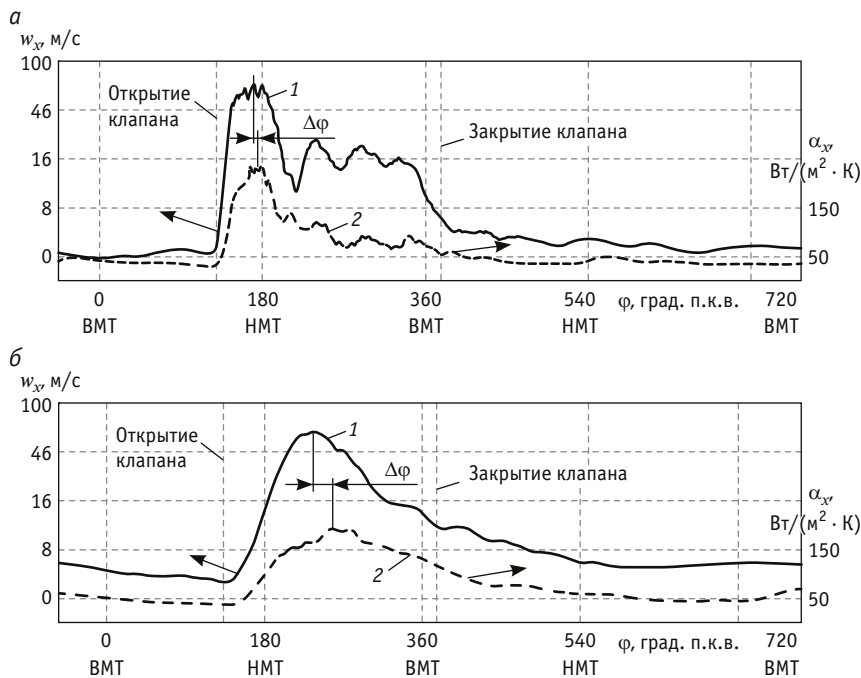


Рис. 4. Зависимости местной скорости потока w_x (1) и ЛКТ α_x (2) от угла поворота коленвала φ в выпускной трубе для давления $p_{ex} = 0,2$ МПа при частотах вращения вала: а — $n = 600$ мин⁻¹; б — $n = 3000$ мин⁻¹

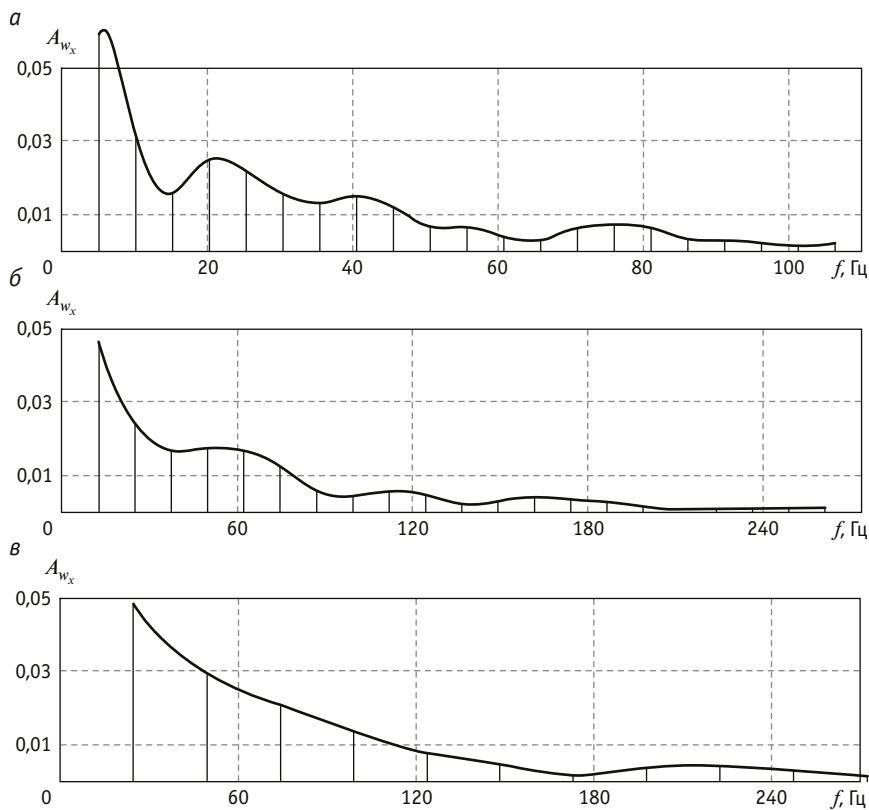


Рис. 5. Амплитудно-частотные спектры пульсаций скорости потока воздуха w_x в ВыпТ для $p_{ex} = 0,2$ МПа при частотах вращения вала: а — $n = 600$ мин⁻¹; б — $n = 1500$ мин⁻¹; в — $n = 3000$ мин⁻¹

ности теплоотдачи потока в ВыпТ. Установлено отличие в достижении максимальных значений α_x и w_x на угол $\Delta\varphi$ (см. рис. 3). Можно констатировать тепломеханическую инерционность варьирования α_x по отношению к w_x . При этом угол $\Delta\varphi$ увеличивался с ростом частоты вращения коленвала (инерционность возрастала). Также необходимо отметить, что вид кривой $\alpha_x = f(\varphi)$ становился заметно более гладким при высоких значениях частоты вращения коленвала (КВ).

Подобные газодинамические и теплообменные закономерности возникали в процессе выпуска при $p_{ex} = 0,2$ МПа (рис. 4). Наблюдались заметные пульсации и флуктуации скорости потока воздуха, что особенно характерно для низких частот вращения КВ. Кроме того, отмечены колебания w_x после закрытия выпускного клапана. Таким образом, подтверждено отличие в достижении максимальных значений α_x и w_x на угол $\Delta\varphi$ (тепломеханическая инерционность) при $p_{ex} = 0,2$ МПа (см. рис. 4).

Соответственно сделан вывод, что для исследуемых газодинамических условий (давлений p_{ex} и частот вращения коленвала) сохраняются общие закономерности интенсивности теплообмена. Можно допустить, что в процессе выпуска возникает несколько режимов течения потока воздуха, которые формируют структуру и уровень теплоотдачи. Поэтому необходимо более подробно рассмотреть газодинамические особенности процессов в ВыпТ, чтобы уточнить механизм изменения ЛКТ на различных скоростных режимах двигателя. С этой целью были получены амплитудно-частотные спектры пульсаций скорости потока воздуха w_x в ВыпТ для давления $p_{ex} = 0,2$ МПа при разных частотах вращения коленвала (рис. 5).

Установлено, что для всех частот вращения коленвала значимые частоты спектра являются кратными, например, для $n = 600$ мин⁻¹ они равны 5, 10, 15, 20 Гц и т.д. Кратность возрастала с увеличением частоты вращения коленвала: при $n = 600$ мин⁻¹ значимые частоты спектра достигали 100 Гц, их кратность составляла 5; при $n = 1500$ мин⁻¹ и $n = 3000$ мин⁻¹ они смещались в область более высоких значений (соответственно до 200 и 250 Гц), также возрастала

и их периодичность (12,5 и 25). Кроме того, следует отметить характер изменения амплитуды значимых частот спектра при разных n (см. рис. 5). Так, при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ наблюдался практически линейный спад амплитуды по мере увеличения частоты f , тогда как при низких и средних n эта закономерность не обнаружена, что можно объяснить сменой режима течения с увеличением частоты вращения коленвала ПДВС.

На возможную смену режима течения также указывают данные о расходных характеристиках через ВыпТ для различных избыточных давлений p_{ex} (рис. 6).

На зависимости $V = f(n)$ наблюдалось несколько характерных участков: участок роста расхода воздуха (до $n \approx 1700 \text{ мин}^{-1}$), участок практически постоянного расхода (1700 < n < 2500 мин^{-1}) и участок снижения расхода воздуха (при $n > 2500 \text{ мин}^{-1}$). Отметим, что увеличение давления на выпуске приводит к пропорциональному росту расхода воздуха через выпускную систему ПДВС. Эти данные хорошо согласуются с результатами, представленными в [21].

Снижение расхода воздуха при высоких частотах вращения коленвала можно объяснить изменением структуры течения, образованием застойных зон в системе и соответствующим уменьшением проходного сечения ВыпТ.

Таким образом, как показал анализ амплитудно-частотных спектров, скоростных и расходных характеристик в ВыпТ поршневого двигателя, газодинамика процесса выпуска менялась в зависимости от частоты вращения коленвала, кроме того, происходила смена режима течения пульсирующего потока. Это привело к трансформации теплообменных характеристик потока и отразилось на зависимости $\alpha_x = f(\varphi)$ в выпускной трубе (рис. 7).

Установлено снижение максимальных значений ЛКТ α_x с ростом частоты вращения коленвала n (см. рис. 7) и смещение пиков α_x по углу поворота коленвала φ (наиболее существенно для $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$).

Таким образом, в ходе проведенных опытов получены экспериментальные данные о газодинамике и теплоотдаче пульсирующих потоков в выпускной си-

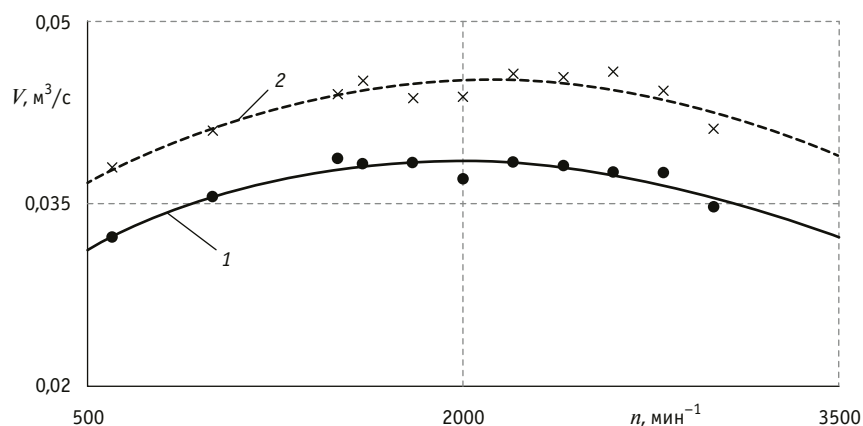


Рис. 6. Зависимости объемного расхода воздуха V через ВыпТ от частоты вращения вала n при разном давлении на выпуске: 1 — $p_{ex} = 0,1 \text{ МПа}$; 2 — $p_{ex} = 0,2 \text{ МПа}$

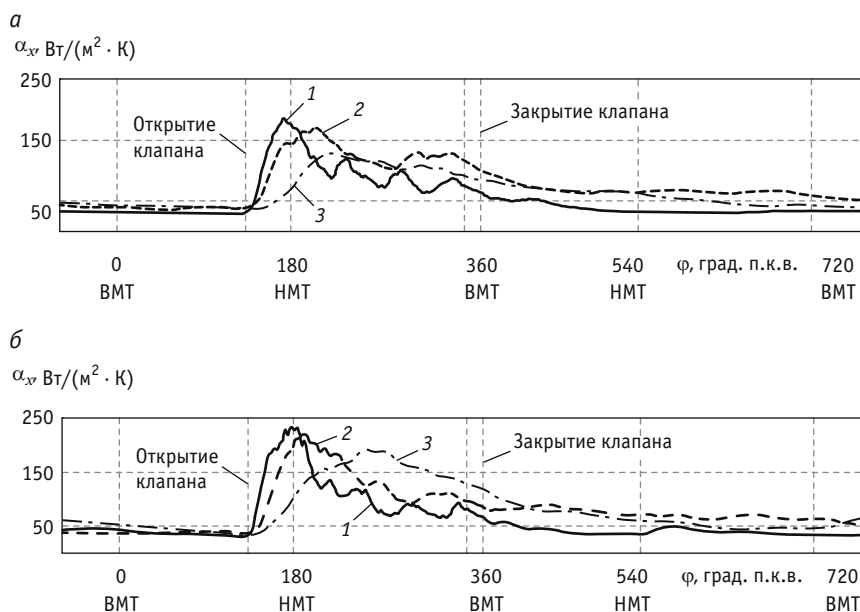


Рис. 7. Зависимости ЛКТ α_x в выпускной трубе от угла поворота коленвала φ для давлений 0,05 МПа (а) и 0,2 МПа (б) при частотах вращения вала: 1 — $n = 600 \text{ мин}^{-1}$; 2 — $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$; 3 — $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$

стеме поршневого двигателя. Эти данные могут использоваться для уточнения математических моделей, модернизации инженерных методик расчета процессов газообмена и проектирования систем выпуска ПДВС.

ВЫВОДЫ

1. Разработан экспериментальный стенд, имитирующий процесс выпуска в поршневом двигателе для широкого диапазона начальных условий; создана автоматизированная измерительная система

(основной экспериментальный метод исследований — тепловая анемометрия).

2. Получены достоверные экспериментальные данные о газодинамических, расходных и теплообменных характеристиках пульсирующих потоков в выпускной системе ПДВС; дополнительно проведен спектральный анализ изменения скорости потока в выпускной трубе.

3. Установлено, что ЛКТ наиболее существенно зависит от частоты вращения коленвала двигателя n и угла поворота коленвала φ .

4. Показано, что с ростом частоты вращения коленвала происходит перестройка структуры течения в ВыпТ, влияющая на газодинамические, расходные и тепломеханические характеристики процесса выпуска в поршневом двигателе внутреннего сгорания.

5. Полученные данные конкретизируют физические особенности течения пульсирующих потоков в гидравлических

системах (характерных для ПДВС) и могут использоваться для совершенствования методик расчета и проектирования газоздушных систем поршневых двигателей внутреннего сгорания различного назначения и размерностей.

Работа выполнена при поддержке РФ в рамках научного проекта 23-29-00022.

Сведения об авторах:

Леонид Валерьевич Плотников, доктор технических наук, профессор кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Олег Вячеславович Комаров, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Данил Алексеевич Давыдов, магистр кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Дмитрий Николаевич Красильников, магистр кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Владислав Александрович Шурупов, магистр кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Authors information:

Leonid V. Plotnikov, DSc in Engineering, Professor of Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

Oleg V. Komarov, PhD in Engineering, Head of Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

Danil A. Davydov, master of Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

Dmitriy N. Krasilnikov, master of Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

Vladislav A. Shurupov, master of Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

Литература

1. The future of ship engines: Renewable fuels and enabling technologies for decarbonization / S. Curran, A. Onorati, R. Payri [et al.] // *International Journal of Engine Research*. 2024. Vol. 25 (1). Pp. 85–110.
2. Won H. W., Bouet A. Toward the European 2030 CO₂ target with gasoline compression ignition technology and 48 V mild electric hybrid // *International Journal of Engine Research*. 2023. Vol. 24 (3). Pp. 1190–1199.
3. Control-oriented modeling of the gas exchange process in rebreathing homogeneous charge compression ignition engines / A. Takeshita, Y. Yamasaki, M. Muto [et al.] // *International Journal of Engine Research*. 2022. Vol. 23 (12). Pp. 1981–2001.
4. Karabulut H., Solmaz H., Ipci D. A coupled thermodynamic and dynamic model of a three cylinder diesel engine: A novel approach for gas exchange process // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 121. Pp. 750–760.
5. Kong K.-J. A 1d–3d approach for fast numerical analysis of the flow characteristics of a diesel engine exhaust gas // *Machines*. 2021. Vol. 9 (10). Article number 239.
6. Kim M., Song H. H. A universally applicable OD turbulence model based on the physical analysis of fundamental tumble behaviors in spark-ignition engines // *International Journal of Engine Research*. 2023. Vol. 24 (5). Pp. 2051–2071.
7. Influence of altitude on two-stage turbocharging system in a heavy-duty diesel engine based on analysis of available flow energy / M. Yang, Y. Gu, K. Deng [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 129. Pp. 12–21.

References

1. Curran S., Onorati A., Payri R. [et al.]. The future of ship engines: Renewable fuels and enabling technologies for decarbonization. *International Journal of Engine Research*. 2024. Vol. 25 (1). Pp. 85–110.
2. Won H. W., Bouet A. Toward the European 2030 CO₂ target with gasoline compression ignition technology and 48 V mild electric hybrid. *International Journal of Engine Research*. 2023. Vol. 24 (3). Pp. 1190–1199.
3. Takeshita A., Yamasaki Y., Muto M. [et al.]. Control-oriented modeling of the gas exchange process in rebreathing homogeneous charge compression ignition engines. *International Journal of Engine Research*. 2022. Vol. 23 (12). Pp. 1981–2001.
4. Karabulut H., Solmaz H., Ipci D. A coupled thermodynamic and dynamic model of a three cylinder diesel engine: A novel approach for gas exchange process. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 121. Pp. 750–760.
5. Kong K.-J. A 1d–3d approach for fast numerical analysis of the flow characteristics of a diesel engine exhaust gas. *Machines*. 2021. Vol. 9 (10). Article number 239.
6. Kim M., Song H. H. A universally applicable OD turbulence model based on the physical analysis of fundamental tumble behaviors in spark-ignition engines. *International Journal of Engine Research*. 2023. Vol. 24 (5). Pp. 2051–2071.
7. Yang M., Gu Y., Deng K. [et al.]. Influence of altitude on two-stage turbocharging system in a heavy-duty diesel engine based on analysis of available flow energy. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 129. Pp. 12–21.

8. Ramkumar J., Krishnasamy A., Ramesh A. A novel method to overcome the shortcomings of turbocharging a single cylinder diesel engine // *International Journal of Engine Research*. 2023. Vol. 24 (3). Pp. 873–887.
9. Шестаков Д. С., Пронин И. Е. Доводка рабочего процесса тепловозных дизелей 8ЧН21/21 с российскими турбокомпрессорами ТКР180 // *Транспорт Урала*. 2015. № 4 (47). С. 81–85. ISSN 1815-9400.
10. Investigation of the effect of different structure parameters and operating factors on the integrated exhaust aftertreatment system for diesel engines and parameter importance analysis / J. Liao, Z. Wang, J. Hu [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 447. Article number 141257.
11. Influence of Exhaust Pipe Structure on Urea-Related Deposits in Diesel Engine SCR System / N. Zhu, H. Song, F. Qian, X. Xu // *Processes*. 2023. Vol. 11 (4). Article number 1199.
12. Dziubak T., Karczewski M., Dziubek I. Empirical study of the effect of the air filter on the performance and exhaust emissions of a diesel engine // *Combustion Engines*. 2023. Vol. 193 (2). Pp. 94–111.
13. Experimental Investigation on Combustion and Performance of Diesel Engine under High Exhaust Back Pressure / L. Huang, J. Liu, R. Liu [et al.] // *Machines*. 2022. Vol. 10 (10). Article number 919.
14. Using a Genetic Algorithm to Achieve Optimal Matching between PMEP and Diameter of Intake and Exhaust Throat of a High-Boost-Ratio Engine / Y. Song, Y. Xu, X. Cheng [et al.] // *Energies*. 2022. Vol. 15 (5). Article number 1607.
15. Research on performance matching of intake and exhaust ports of marine medium speed dual fuel engine / B. Li, Y.-P. He, Z.-Y. Qian [et al.] // *Energy Reports*. 2021. Vol. 7. Pp. 72–83.
16. Шестаков Д. С., Лашманов Д. А. Модернизация выпускных коллекторов тепловозного дизель-генератора ДГ882Л // *Транспорт Урала*. 2020. № 3 (66). С. 68–71. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-3-68-71.
17. Lee C.-Y., Tu L.-F. Influence of tumble and TKE on combustion, fuel economy, and emissions of a single cylinder motorcycle engine // *International Journal of Engine Research*. 2023. Vol. 24 (4). Pp. 1400–1413.
18. Experimental Validation of a Multi-Purpose Exhaust System Designed for a Naval Propulsion Group / O. Dumitrescu, V. Drăgan, B. Gherman [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11 (2). Article number 304.
19. Plotnikov L. A Thermal Anemometry Method for Studying the Unsteady Gas Dynamics of Pipe Flows: Development, Modernisation, and Application // *Sensors*. 2023. Vol. 23 (24). Article number 9750.
20. Улучшение эксплуатационных показателей автомобильных двигателей внутреннего сгорания путем совершенствования термогазодинамики во впускной системе / Л. В. Плотников, Н. И. Григорьев, Н. С. Кочев, Л. Е. Осипов // *Транспорт Урала*. 2020. № 2 (61). С. 47–51. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-47-51.
21. Plotnikov L. V. Thermal-mechanical characteristics of stationary and pulsating gas flows in a gas-dynamic system (in relation to the exhaust system of an engine) // *Thermal Science*. 2022. Vol. 26 (1A). Pp. 365–376.
8. Ramkumar J., Krishnasamy A., Ramesh A. A novel method to overcome the shortcomings of turbocharging a single cylinder diesel engine. *International Journal of Engine Research*. 2023. Vol. 24 (3). Pp. 873–887.
9. Shestakov D. S., Pronin I. E. Adjustment of operation of 8CHN21/21 diesel locomotive engines with Russian TKR180 turbocharger. *Transport of the Urals*. 2015. No. 4 (47). Pp. 81–85. ISSN 1815-9400. (In Russian).
10. Liao J., Wang Z., Hu J. [et al.]. Investigation of the effect of different structure parameters and operating factors on the integrated exhaust aftertreatment system for diesel engines and parameter importance analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 447. Article number 141257.
11. Zhu N., Song H., Qian F., Xu X. Influence of Exhaust Pipe Structure on Urea-Related Deposits in Diesel Engine SCR System. *Processes*. 2023. Vol. 11 (4). Article number 1199.
12. Dziubak T., Karczewski M., Dziubek I. Empirical study of the effect of the air filter on the performance and exhaust emissions of a diesel engine. *Combustion Engines*. 2023. Vol. 193 (2). Pp. 94–111.
13. Huang L., Liu J., Liu R. [et al.]. Experimental Investigation on Combustion and Performance of Diesel Engine under High Exhaust Back Pressure. *Machines*. 2022. Vol. 10 (10). Article number 919.
14. Song Y., Xu Y., Cheng X. [et al.]. Using a Genetic Algorithm to Achieve Optimal Matching between PMEP and Diameter of Intake and Exhaust Throat of a High-Boost-Ratio Engine. *Energies*. 2022. Vol. 15 (5). Article number 1607.
15. Li B., He Y.-P., Qian Z.-Y. [et al.]. Research on performance matching of intake and exhaust ports of marine medium speed dual fuel engine. *Energy Reports*. 2021. Vol. 7. Pp. 72–83.
16. Shestakov D. S., Lashmanov D. A. Modernization of exhaust manifolds of DG882L diesel-generator for diesel locomotives. *Transport of the Urals*. 2020. No. 3 (66). Pp. 68–71. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-3-68-71. (In Russian).
17. Lee C.-Y., Tu L.-F. Influence of tumble and TKE on combustion, fuel economy, and emissions of a single cylinder motorcycle engine. *International Journal of Engine Research*. 2023. Vol. 24 (4). Pp. 1400–1413.
18. Dumitrescu O., Drăgan V., Gherman B. [et al.]. Experimental Validation of a Multi-Purpose Exhaust System Designed for a Naval Propulsion Group. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11 (2). Article number 304.
19. Plotnikov L. A Thermal Anemometry Method for Studying the Unsteady Gas Dynamics of Pipe Flows: Development, Modernisation, and Application. *Sensors*. 2023. Vol. 23 (24). Article number 9750.
20. Plotnikov L. V., Grigoryev N. I., Kochev N. S., Osipov L. E. Improvement of operational indicators of automobile internal combustion engines by development of thermogasdynamics in intake system. *Transport of the Urals*. 2020. No. 2 (61). Pp. 47–51. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-47-51. (In Russian).
21. Plotnikov L. V. Thermal-mechanical characteristics of stationary and pulsating gas flows in a gas-dynamic system (in relation to the exhaust system of an engine). *Thermal Science*. 2022. Vol. 26 (1A). Pp. 365–376.

Научная статья

УДК 656.13

Обоснование состава и периодичности выполнения контрольно-диагностических и восстановительных операций при техническом обслуживании автомобилей

 Виктор Иванович Карагодин¹, Лев Леонидович Зиманов¹
¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия

Rationale of the composition and periodicity of performing the diagnostic and restoration operations when car maintenance is being carried out

 Viktor I. Karagodin¹, Lev L. Zimanov¹
¹Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

Аннотация

Управление периодичностью технического обслуживания автомобилей, оставаясь основным инструментом обеспечения надежности подвижного состава, стало также инструментом конкурентной борьбы фирм-изготовителей. Некоторые производители заявляют об увеличении периодичности технического обслуживания своих автомобилей, представляя это как доказательство повышения качества продукции по сравнению с конкурентами.

В статье по результатам фактического экспериментального материала на примере автомобилей Kia бизнес-класса доказано, что чрезмерное увеличение периодичности технического обслуживания приводит к снижению надежности подвижного состава и что периодичность должна быть не максимальной, а оптимальной, а также установлены оптимальные периодичность и состав контрольно-диагностических и восстановительных операций, выполняемых при техническом обслуживании автомобилей.

Ключевые слова: периодичность технического обслуживания, состав работ, диагностирование, вероятность отказа, затраты

Abstract

The control of the frequency of car maintenance, remaining the main tool to ensure the safety of a rolling stock, has also become a tool of the competition struggle of manufacturers. Some manufacturers announce of the periodicity increase of the technical maintenance of their automobiles, presenting it as the proof of the raise of the quality of their products in comparison to their competitors.

Operating the results of the experimental data of Kia business-class cars, the article proves that an extreme raise of the periodicity of technical maintenance leads to the reduce of the safety of a rolling stock and that the periodicity must not be maximum but optimal. Also, optimal periodicity and the composition of the diagnostic and restoration operations when car maintenance is being carried out have been set.

Keywords: periodicity of technical maintenance, the composition of work, diagnosing, probability of failure, expenses

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-56-61

ВВЕДЕНИЕ

Современная система планово-предупредительного ремонта включает проведение при техническом обслуживании контрольно-диагностических работ и выполнение при необходимости восстановительных операций (ремонта, смазывания, крепежных работ) [1]. Это обеспечивает достижение высокой безотказности автомобилей [2]. Однако для максимальной эффективности технической эксплуатации подвижного состава необходимо, чтобы комплекс и периодичность выполнения контрольно-диагностических и восстановительных работ были оптимальными [3, 4].

С целью всестороннего анализа и убедительного доказательства правильного выбора периодичности выполнения всех операций необходимо проанализировать три варианта организации системы технического обслуживания [5]. *Первый вариант* — отсутствие диагностирования и своевременного устранения отказов и неисправностей. Он может быть принят за базовый, сравнение с которым показывает эффективность различных вариантов состава и периодичности выполнения всех операций. *Второй вариант* рекомендован заводом-изготовителем. Выполнение заданного комплекса операций с периодичностью, установленной заводом-изготовителем, позволяет повысить вероятность безотказной работы составных частей и автомобиля в целом, но не исключает возможности дальнейших улучшений. Для этого необходимы объективная оценка существующего варианта и поиск путей его улучшения для проверки гипотезы о существовании оптимального состава и периодичности выполнения контрольно-диагностических и восстановительных операций, которые могут рассматриваться как *третий вариант*.

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Если при проведении технического обслуживания контроль технического состояния какого-либо механизма автомобиля и воздействие на этот механизм не предусмотрены, дальней-

шее изменение его технического состояния происходит без отклонений от закономерности, которой он подчиняется. Прогнозирование технического состояния и момента возникновения отказа механизма возможно, если эта закономерность известна, чаще всего определена экспериментально [6].

При техническом обслуживании механизма контроль (или диагностирование) позволяет более точно и достоверно прогнозировать период его безотказной работы. А если провести восстановительные работы, то можно не только улучшить прогноз, но и увеличить сам период безотказной работы элемента.

Полученные в результате диагностирования значения параметров сравнивают с установленными нормативами. Ресурс механизма после капитального ремонта должен достигать не менее 80 % его доремонтного ресурса. После текущего ремонта по техническому состоянию механизм должен без каких-либо воздействий сохранять работоспособность и исправность до следующего планового контроля [7]. Поскольку контроль (диагностирование) осуществляется, как правило, при ТО-2, то и механизм должен исправно работать до очередного ТО-2. Таким образом, в межконтрольный период смежных технических обслуживаний вероятность отказа механизма зависит от факта и характера воздействия на него при техническом обслуживании, предшествовавшем этому межконтрольному периоду.

При обработке результатов выполненных экспериментальных исследований надежности легковых автомобилей Kia согласно анализу характера отказов [8] и рекомендациям [9] была выдвинута и впоследствии проверена гипотеза о распределении наработок на отказ составных частей автомобиля по закону Вейбулла – Гнеденко. Вероятность отказа составной части автомобиля на пробеге t при законе Вейбулла – Гнеденко имеет вид [10]

$$P_o(t) = 1 - e^{-(t/a)^b} \quad (1)$$

Методика обоснования периодичности проведения диагностирования и состава контрольно-диагностических операций предусматривает выполнение следующих этапов.

1. Для рекомендованных заводом-изготовителем периодичности проведения технических обслуживаний и состава выполняемых при них восстановительных и контрольно-диагностических операций определяют вероятности отказов составных частей автомобилей, не подвергавшихся диагностированию и восстановительным работам, составных частей, прошедших плановые диагностирование и воздействия, и вероятности отказов автомобиля в целом.

Вероятность отказа в межконтрольный период составной части автомобиля, не подвергавшейся диагностированию и восстановительным работам, может быть определена по формуле

$$P_o(l_i) = \frac{n(l_i)}{A(l_i)}, \quad (2)$$

где $n(l_i)$ — число отказов рассматриваемой составной части автомобиля в межконтрольный период l_i ; $A(l_i)$ — общее коли-

чество автомобилей, прошедших плановое техническое обслуживание и диагностирование в начале межконтрольного периода l_i и проработавших до конца этого периода.

Вероятность отказа автомобиля в целом $P_{oa}(t_i)$ определяется по формуле

$$P_{oa}(t_i) = 1 - \prod_{j \in H} [1 - P_{oj}(t_i)] \cdot \prod_{j \in D} [1 - P_{oj}(l_i)], \quad (3)$$

где j — индекс составной части; H — подмножество составных частей, не подвергавшихся диагностированию и восстановительным работам; D — подмножество составных частей, прошедших плановые диагностирование и воздействия.

2. Для составных частей автомобиля, лимитирующих его безотказность, предусматривают изменение периодичности проведения технического обслуживания и (или) состава восстановительных и контрольно-диагностических операций. На этом этапе для повышения безотказности автомобиля в целом может быть проведено диагностирование составных частей, которые раньше не диагностировались [11], для некоторых составных частей уменьшена периодичность диагностирования, а в отдельных случаях для составных частей, характеризующихся высокой безотказностью, периодичность диагностирования может быть увеличена.

3. Для каждого сформированного варианта определяют вероятности отказов составных частей автомобилей и вероятности отказов автомобиля в целом.

4. Из рассматриваемых вариантов отбирают те, которые удовлетворяют предъявляемым требованиям по безотказности, и оценивают экономические последствия перехода к наилучшему варианту для клиента и для станции технического обслуживания автомобилей (СТОА).

5. Выбирают вариант периодичности технического обслуживания и состава восстановительных и контрольно-диагностических операций, в наибольшей степени приемлемый для клиента и для СТОА.

РАСЧЕТЫ И АНАЛИЗ РАССМАТРИВАЕМЫХ ВАРИАНТОВ

Фрагмент графика планового технического обслуживания автомобилей Kia, рекомендованного заводом-изготовителем, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Фрагмент рекомендованного графика планового технического обслуживания

Системы и механизмы	Пробег, тыс. км								
	1	10	20	30	40	50	60	70	80
Тормозная система	–	–	1	–	1	–	1	–	1
Несущая система	–	–	–	–	1	–	–	–	1
Сцепление	–	1	1	1	1	1	1	1	1
Коробка передач	1	–	–	–	1	–	–	–	1
Двигатель	1	–	1	–	1	–	1	–	1
Электрооборудование	–	1	1	1	1	1	1	1	1

Периодичность технического обслуживания автомобилей в гарантийный период установлена в 10 тыс. км [12, 13]. Однако при каждой постановке автомобиля на обслуживание перечень систем и механизмов, с которыми проводятся восстановительные и контрольно-диагностические работы, различается. При каждом обслуживании в этот перечень входят сцепление и электрооборудование. Через одно обслуживание с периодичностью 20 тыс. км проводятся работы по двигателю и тормозной системе. При каждом четвертом обслуживании с периодичностью 40 тыс. км подвергаются проверке и при необходимости воздействию коробка передач и несущая система. Одновременно с ними проверяется техническое состояние наконечника рулевой тяги.

Вероятности отказа всех составных частей автомобиля были определены по данным эксплуатационных наблюдений. На рис. 1 полученные результаты объединены по системам автомобиля и представлены укрупненно.

Данные рис. 1 показывают, что к пробегу 100 тыс. км отказ автомобиля обязательно произойдет. Это обусловлено тем, что в состав механизмов управления входит элемент с низкой безотказностью — тормозные колодки. Средняя наработка на первый отказ передних колодок составляет 50,95 тыс. км при коэффициенте вариации 0,40, задних колодок — 56,92 тыс. км при коэффициенте вариации 0,42. Средняя наработка на последующие отказы передних колодок составляет 31,37 тыс. км при коэффициенте вариации 0,57, задних колодок — 37,71 тыс. км при коэффициенте вариации 0,59. Но отказов можно избежать при своевременном прохождении планового технического обслуживания, что является обязанностью владельца автомобиля [14].

Для установленного заводом-изготовителем графика планового технического обслуживания (см. табл. 1) были статистически определены вероятности отказов составных частей на соответствующих интервалах пробега при условии прохождения автомобилями планового технического обслуживания (рис. 2).

При пробеге 20 тыс. км контроль состояния передних тормозных колодок прошли 107 автомобилей. Из них только 99 автомобилей проходили очередное техническое обслуживание при пробеге 30 тыс. км. Информация об остальных 8 автомобилях утрачена. На пробеге от 20 до 30 тыс. км произошел один отказ передних тормозных колодок, а на пробеге от 30 до 40 тыс. км — 3 отказа. Поскольку периодичность контроля передних тормозных колодок — 20 тыс. км (см. табл. 1), в течение установленного межконтрольного периода произошло 4 их отказа, приходящихся на 99 автомобилей, наблюдение за которыми продолжалось до пробега 40 тыс. км. Поэтому вероятность отказа передних тормозных колодок на пробеге от 20 до 40 тыс. км определена как частное от деления 4 на 99, что составило 0,0404, а вероятность отказа на пробеге от 20 до 30 тыс. км — как частное от деления 1 на 107, что составило 0,0093. Аналогично определены вероятности отказа передних тормозных колодок на последующем пробеге, а также вероятности отказа других элементов автомобиля.

На рис. 3 видно, что при выполнении рекомендаций завода-изготовителя вероятность отказа автомобиля резко снижается, но все же остается высокой.

Вероятность отказа

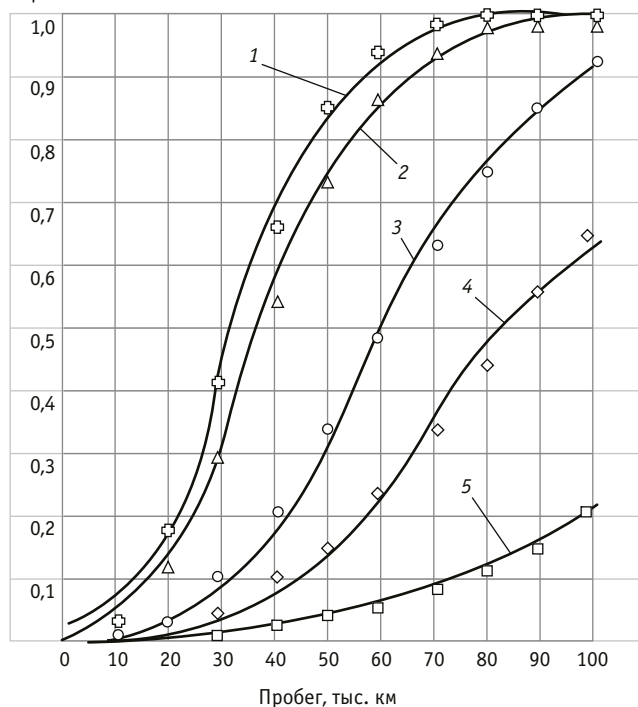


Рис. 1. Вероятности отказов автомобиля в целом (1), механизмов управления (2), несущей системы (3), двигателя (4), трансмиссии (5) по интервалам пробега

Количество отказов

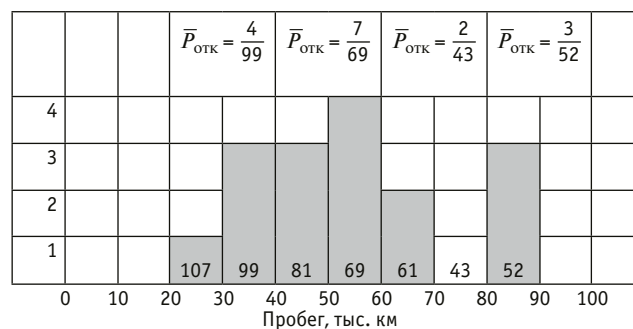


Рис. 2. Определение вероятности отказов передних тормозных колодок в межконтрольные периоды при установленном графике планового обслуживания

Поэтому было принято решение снизить вероятность отказа автомобиля за счет уменьшения периодичности контроля тормозной системы и подшипника ступицы переднего колеса до 10 тыс. км, а несущей системы, кроме подшипника ступицы переднего колеса, — до 20 тыс. км (табл. 2).

Из рис. 3 видно, что переход к рекомендуемой периодичности технического обслуживания позволяет снизить вероятность отказа автомобиля практически вдвое (линия 3).

Различный характер зависимостей по рассматриваемым вариантам объясняется следующим. Вероятности отказов автомобиля в целом — это комплексный показатель, составляющими которого являются вероятности отказов отдельных со-

Вероятность отказа

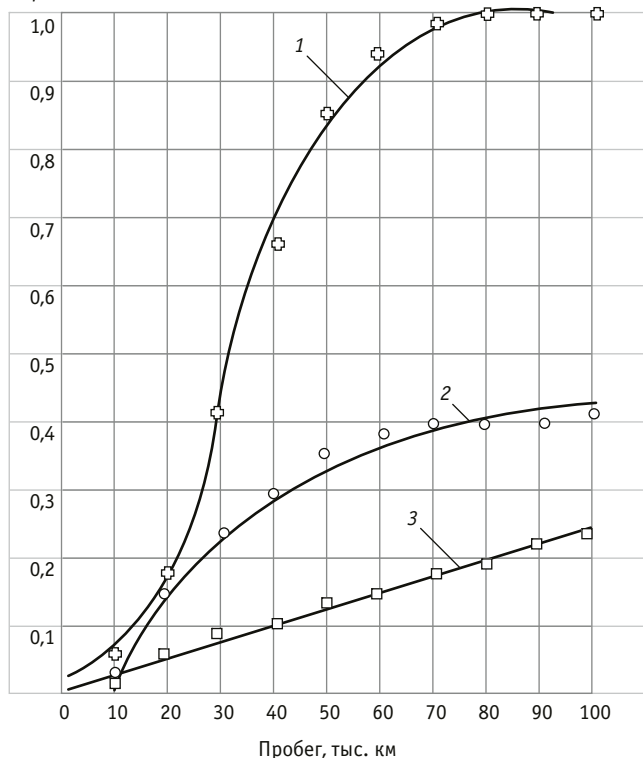


Рис. 3. Вероятности отказов по интервалам пробега:

- 1 — при отсутствии технического обслуживания;
- 2 — при периодичности технического обслуживания, установленной заводом-изготовителем; 3 — при рекомендуемой периодичности технического обслуживания

ставных частей. При отсутствии технического обслуживания вероятности отказов автомобиля определяются наработками на отказ отдельных его составных частей, распределенных, как показано выше, по закону Вейбулла — Гнеденко. Комбинация большого числа параметров, распределенных по закону Вейбулла — Гнеденко, приводит к сложному виду обобщенной зависимости вероятности отказа автомобиля от его наработки, имеющей вид параболы третьей степени.

При проведении технического обслуживания с периодичностью, установленной заводом-изготовителем, в комбинацию с параметрами, распределенными по закону Вейбулла — Гнеденко, вступает большое число параметров, отражающих вероятности отказов в межконтрольных периодах и линейно зависимых либо независимых от пробега автомобиля. В этом случае обобщенная зависимость вероятности отказа автомобиля от его наработки имеет вид, близкий к параболе второй степени.

Переход к рекомендуемой периодичности технического обслуживания сводит к минимуму влияние параметров, распределенных по закону Вейбулла — Гнеденко, поскольку в этом случае достигается максимальное предупреждение возможных отказов составных частей и превалирующим становится влияние вероятностей отказов в межконтрольные периоды диагностированных составных частей, линейно зависимых либо независимых от пробега автомобиля. Этим определяется ха-

Таблица 2

Фрагмент рекомендуемого графика планового технического обслуживания

Контролируемые системы и элементы	Пробег, тыс. км								
	1	10	20	30	40	50	60	70	80
Тормозная система и подшипник ступицы переднего колеса	-	-	1	1	1	1	1	1	1
Несущая система, кроме подшипника ступицы переднего колеса	-	-	1	-	1	-	1	-	1
Сцепление	-	1	1	1	1	1	1	1	1
Коробка передач	1	-	-	-	1	-	-	-	1
Двигатель	1	-	1	-	1	-	1	-	1
Электрооборудование	-	1	1	1	1	1	1	1	1

Таблица 3

Сравнительный анализ установленного изготовителем и рекомендуемого графиков планового технического обслуживания

Пробег, км	Варианты			
	Действующий		Рекомендуемый	
	Вероятности отказов	Стоимость работ, руб.	Вероятности отказов	Стоимость работ, руб.
10000	0,0184	8910	0,0184	8910
20000	0,0597	13680	0,0597	13680
30000	0,2426	13680	0,0879	19260
40000	0,2971	19260	0,1168	19260
50000	0,3549	13680	0,1386	19260
60000	0,3821	13680	0,1552	19260
70000	0,4004	13680	0,1790	19260
80000	0,4046	19260	0,1985	19260
90000	0,4089	13680	0,2178	19260
100000	0,4132	13680	0,2368	19260
Всего	-	143190	-	176670

рактер зависимости вероятности отказа автомобиля от его наработки, которая имеет вид, близкий к линейной зависимости.

Экономические последствия полученных результатов для клиента и для СТОА приведены в табл. 3.

Из данных табл. 3 видно, что переход к рекомендуемым режимам технического обслуживания и диагностирования автомобилей выгоден и СТОА, и владельцу автомобиля. На пробеге автомобиля 100 тыс. км примерно за три года эксплуатации или несколько больший срок СТОА может получить дополнительный доход более 30 тыс. руб. с каждого автомобиля. Владелец автомобиля волен выбирать, следовать рекомендациям завода-изготовителя или прислушаться к рекомендациям СТОА,

основанным на результатах представленной здесь работы. При этом нужно учитывать заинтересованность завода-изготовителя в пропаганде большой периодичности выполнения работ по многим агрегатам и системам автомобиля. А для владельца автомобиля кажущаяся экономия на техническом обслуживании может обернуться потерями от отказов. За лишние 30 тыс. руб., потраченные примерно за три года, т.е. за 10 тыс. руб. в год, владелец автомобиля снизит риск его отказа практически вдвое. Следовательно, переход к рекомендуемым режимам технического обслуживания и диагностирования автомобилей выгоден и СТОА, и автовладельцу.

ВЫВОДЫ

1. При отсутствии технического обслуживания вероятность отказа автомобиля задолго до конца гарантийного пробега 100 тыс. км достигает 100 %. При установленном изготови-

телем регламенте работ, выполняемых при каждом техническом обслуживании, в течение гарантийного пробега вероятность отказа автомобиля существенно ниже, а к концу гарантийного пробега достигает 40 %. Это намного лучше, чем без обслуживания, но при этом не все резервы повышения безотказности исчерпаны.

2. При рекомендуемом варианте периодичности и регламента работ технического обслуживания вероятности отказа автомобилей в течение и к концу гарантийного пробега почти вдвое ниже, чем вероятности отказа автомобилей, регулярно проходящих установленное изготовителем плановое техническое обслуживание.

3. Переход к рекомендуемым режимам технического обслуживания и диагностирования автомобилей выгоден и СТОА, и владельцу автомобиля, но может быть осуществлен только на добровольной основе.

Сведения об авторах:

Виктор Иванович Карагодин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Дорожно-строительные машины» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета

Лев Леонидович Зиманов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета

Authors information:

Viktor I. Karagodin, DSc in Engineering, Professor, Professor of Road Building Machines Department, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University

Lev L. Zimanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Operation and Servicing of Motor Vehicles Department, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University

Литература

1. Карагодин В. И. Организация и технология централизованного ремонта автомобильных двигателей по техническому состоянию : монография. Москва : Русайнс, 2021. 108 с.
2. Солнцев А. А., Зенченко В. А., Гулый В. В. К вопросу формирования элементов, лимитирующих надежность легковых автотранспортных средств с целью прогнозирования и оптимизации функционирования систем управления запасами // Транспортное дело России. 2018. № 6. С. 371–374. ISSN 2072-8689.
3. Абрамов А. Н. Эксплуатационная надежность технических систем. Москва : МАДИ, 2019. 120 с.
4. Методические указания (надежность в технике). Методы оценки показателей надежности по эксплуатационным данным. РД 50-690-89. Москва : Изд-во стандартов, 1990. 132 с.
5. К вопросу оценки и управления качеством технического обслуживания и ремонта автомобилей / В. И. Карагодин, А. Б. Головкин, А. А. Нерезов, О. Б. Танчук // Транспорт: наука, техника, управление. 2010. № 1. С. 50–52. ISSN 0236-1914.
6. Определение закономерностей распределения отказов элементов, лимитирующих работоспособность легковых автомобилей / В. В. Гулый, А. А. Солнцев, А. Р. Асоян, В. С. Ершов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2022. № 2 (69). С. 7–13. ISSN 2079-1364.
7. Руководство по организации диагностирования легковых автомобилей на СТО системы «Автотехобслуживание». РД 37.009.010-85. Москва, 1985.
8. Исследование операций : в 2-х томах ; пер. с англ. / Под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. Москва : Мир, 1981. Т. 1. — 712 с. Т. 2. — 677 с.

References

1. Karagodin V. I. Organization and technology of centralized repair of motor engines under technical condition : monograph. Moscow : Ru-Science, 2021. 108 p. (In Russian).
2. Solntsev A. A., Zenchenko V. A., Guliy V. V. On the issue of forming elements, limiting the reliability of motor vehicles with the purpose of predicting and optimizing the operation management systems. *Transport business of Russia*. 2018. No. 6. Pp. 371–374. ISSN 2072-8689. (In Russian).
3. Abramov A. N. Technical systems exploitation safety. Moscow : MADI, 2019. 120 p. (In Russian).
4. Guidance (reliability in technique). Evaluation methods of the indicators of the exploitation data reliability. RD 50-690-89. Moscow : Publishing House of Standards, 1990. 132 p. (In Russian).
5. Karagodin V. I., Golovko A. B., Nerezov A. A., Tanchuk O. B. To the problem of evaluation and quality control of car maintenance and repair. *Transport: science, equipment, management*. 2010. No. 1. Pp. 50–52. ISSN 0236-1914. (In Russian).
6. Guliy V. V., Solntsev A. A., Asoyan A. R., Ershov V. S. Determination of the patterns of distribution of failures of elements that limit the performance of passenger cars. *Vestnik MADI*. 2022. No. 2 (69). Pp. 7–13. ISSN 2079-1364. (In Russian).
7. Guidance on the organization of diagnostics of light vehicles in automotive repair field of «car maintenance» system. RD 37.009.010-85. Moscow, 1985. (In Russian).
8. Handbook of Operations Research : in 2 books ; translated from English. Ed. by J. Moder, S. Elmaghraby. Moscow : World, 1981. Vol. 1. — 712 p. Vol. 2. — 677 p. (In Russian).

9. Техническая эксплуатация автомобилей / Е. С. Кузнецов, А. П. Болдин, В. М. Власов [и др.]. Москва : Наука, 2001. 535 с.
10. Карагодин В. И. Математическое моделирование процессов и систем технического сервиса на транспорте. Прикладные задачи. Москва : КНОРУС, 2024. 374 с.
11. Гунба В. С., Кутовой С. С., Лавров А. Б. Методика обоснования эффективной стратегии замен деталей агрегатов военной автомобильной техники // Научный резерв. 2022. № 2 (18). С. 27–33. ISSN 2658-5901.
12. KIA SPORTAGE. Модели 2010–2016 гг. выпуска с бензиновым G4KD (2,0 л) и дизельным D4HA (2,0 л CRDI) двигателями. Серия «Профессионал». Каталог расходных запасных частей. Характерные неисправности. Руководство по ремонту и техническому обслуживанию. Москва : Легион-Автодата, 2018. 606 с.
13. Kia Rio / Kia K2 с 2017 г. Руководство по ремонту и эксплуатации. Москва : Монолит, 2022. 406 с.
14. Положение о техническом обслуживании и ремонте автотранспортных средств, принадлежащих гражданам (легковые и грузовые автомобили, автобусы, мини-трактора). РД 37.009.026-92. Москва, 1992. 40 с.
9. Kuznetsov E. S., Boldin A. P., Vlasov V. M. [et al.]. Technical exploitation of cars. Moscow : Science, 2001. 535 p. (In Russian).
10. Karagodin V. I. Mathematical modelling of the processes and systems of transport technical service. Applied Problems. Moscow : KNORUS, 2024. 374 p. (In Russian).
11. Gunba V. S., Kutovoy S. S., Lavrov A. B. Methodology for substantiation of an effective strategy for replacing parts of units of military vehicle equipment. *Scientific reserve*. 2022. No. 2 (18). Pp. 27–33. ISSN 2658-5901. (In Russian).
12. KIA SPORTAGE. Models produced in 2010-2016 with gasoline G4KD (2.0 l) and diesel D4HA (2.0 l CRDI) engines. «Professional» series. Spare parts catalogue. Typical failures. Guide to repair and maintenance. Moscow : Legion-Autodata, 2018. 606 p. (In Russian).
13. Kia Rio / Kia K2 since 2017. Guide to repair and maintenance. Moscow : Nonolith, 2022. 406 p. (In Russian).
14. Regulation on technical maintenance and repair of vehicles owned by citizens (light vehicles and trucks, buses, mini-tractors). RD 37.009.026-92. Moscow, 1992. 40 p. (In Russian).

Объем статьи 0,66 авторских листа

Научная статья

УДК 656.224

Формирование транспортно-пересадочного узла при взаимодействии автомобильного и железнодорожного транспорта

 Сергей Петрович Вакуленко¹, Александр Константинович Головнич², Надежда Юрьевна Евреенова¹
¹Российский университет транспорта, Москва, Россия

²Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь

Transport hub formation under the interaction of motor with railway transport

 Sergey P. Vakulenko¹, Alexander K. Golovnich², Nadezhda Yu. Evreenova¹
¹Russian University of Transport, Moscow, Russia

²Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

Аннотация

В статье рассматривается проблема плавности сопряжения переходов пассажиров в транспортно-пересадочных узлах (ТПУ) при взаимодействии автомобильного и железнодорожного транспорта. Проанализированы три варианта интеграции подсистем железнодорожного и автотранспорта: с глубоким переходом пассажиропотока, с близким переходом пассажиропотока, с пересечением объектов взаимодействующих видов транспорта. Выделены особенности каждого варианта интеграции: глубокий переход позволяет сглаживать несоразмерность пассажиропотоков отдельных единиц подвижного состава автомобильного и железнодорожного транспорта; при близком переходе осуществляется меньшая ориентация на нетранспортное обслуживание пассажиров; при пересечении объектов взаимодействующих видов транспорта в ТПУ развязки пассажиропотоков должны размещаться в разных уровнях, количество которых определяется исходя из числа видов транспорта, обеспечивающих пригородное или пригородно-городское движение.

Ключевые слова: планировочная структура, транспортно-пересадочный узел, пассажирские перевозки, пассажиропоток, автотранспорт, железнодорожный транспорт

Abstract

The article deals with the problem of smoothness of transferring passengers in transport hubs (TH) under the interaction of motor with railway transport. Three variants of integration of the subsystems of railway with motor transport have been analyzed: with deep passenger flow transfer, with close passenger transfer, with the crossing of the objects of interacting means of transport. Each integration variant peculiarities have been emphasized: deep transfer helps smooth passenger mismatch of single units of a rolling stock of railway and motor transport; under the close transfer there is a less orientation to a non-transport passenger service; under the crossing of the objects of interacting means of transport in transport hubs the interchanges of passenger flows must be located in several levels the number of which should be determined taking into account the number of means of transport providing suburban or suburban-urban traffic.

Keywords: planning structure, transport hub, passenger transfers, passenger flow, motor transport, railway transport

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-62-66

Транспортно-пересадочные узлы (ТПУ) — ключевой элемент системы взаимодействия железнодорожного и автомобильного транспорта при городских, пригородно-городских и пригородных перевозках [1]. Эти объекты следует рассматривать не только как связующие позиции перехода пассажиров, но и как буферные зоны, которые должны погасить различия двух видов транспорта, способных оказать друг на друга негативное влияние. Железнодорожный и автомобильный транспорт, обеспечивая перевозку пригородно-городских и пригородных пассажиров, характеризуются аналогичными техническими и технологическими параметрами, которые можно сравнивать. Однако в силу особенностей, присущих каждому из этих видов транспорта, многие сопоставляемые характеристики (например, вместимость подвижного состава, скоростные показатели, технология обслуживания и др.) существенно отличаются по величине [2, 3]. С точки зрения эффективного обслуживания пригородных и пригородно-городских пассажиров ТПУ следует рассматривать как область взаимного перехода. Эти буферные зоны подготавливают пассажиропоток, приходящий на железнодорожный транспорт с автомобильного и наоборот. Они формируют структуру и содержание пассажиропотока таким образом, что после данной «обработки» он полностью соответствует по параметрам подвижному составу, обеспечивающему перевозку вида транспорта.

Транспортно-пересадочный узел как буферная зона должен иметь определенное техническое оснащение, а время нахождения в нем пассажиров — величина достаточно нормированная [4, 5]. Именно с таких позиций обеспечивается плавность перехода пассажиров с одного вида транспорта на другой. Различия железнодорожного и автомобильного транспорта поглощаются только на определенной территории, площадь которой зависит от пассажиропотока, переходящего с одного вида транспорта на другой, при этом время нахождения в пути таких пассажиров фиксировано.

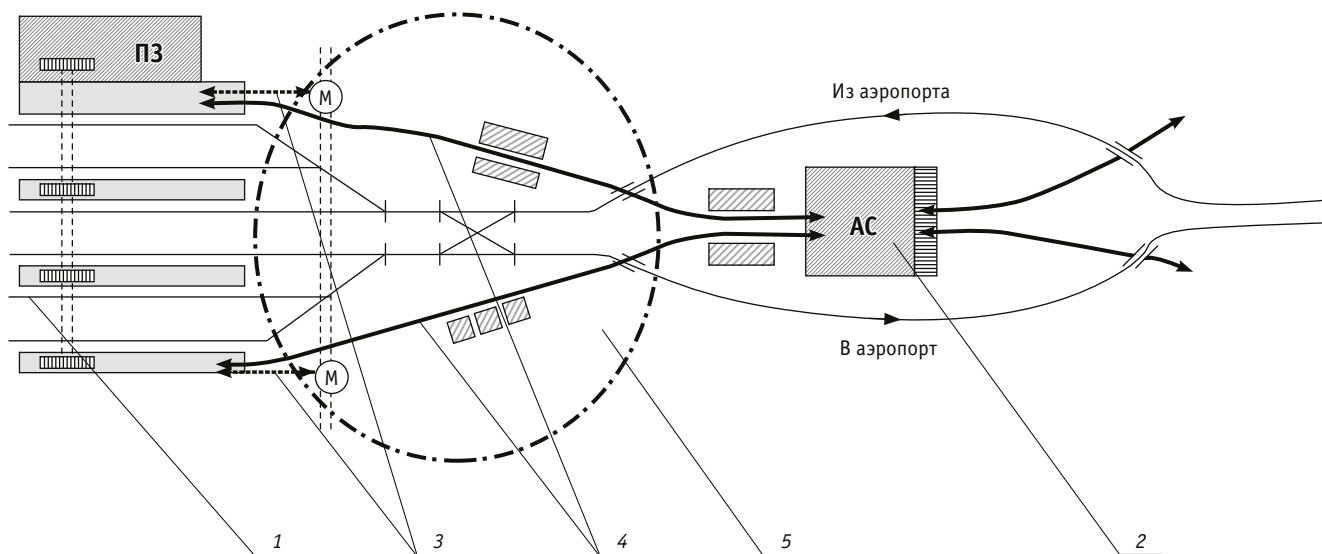


Рис. 1. Схема взаимодействия двух видов транспорта с интеграцией подсистем через дальний переход пассажиропотока:
 1 — пассажирская станция; 2 — автостанция с посадочными платформами; 3 — пассажиропоток «железная дорога — метрополитен»;
 4 — пассажиропоток «железная дорога — автотранспорт»; 5 — зона перехода

Понятие плавности перехода означает наличие определенной области, уже не принадлежащей одному виду транспорта и еще не принадлежащей другому, а также наличие определенного периода времени, необходимого для адаптации пассажиропотока к условиям поездки на другом виде транспорта [6].

Для подготовки пассажиропотока необходима некоторая область пространства D_0 и некоторая продолжительность времени T_0 . Эти параметры с размерностями площади (m^2) и времени (мин) являются определяющими и характеризуют происходящие изменения пригородного пассажиропотока [7]. Область пространства D_0 представляет собой застроенную соотвествующим комплексом устройств территорию, на которой должны быть запроектированы устройства и железнодорожного, и автомобильного транспорта. Комплексами устройств железнодорожного транспорта прежде всего являются пассажирские или зонные станции, а также остановочные пункты [8]. С этих позиций важно определить степень интеграции обеих подсистем. Выделим три варианта интеграции подсистем железнодорожного и автотранспорта при перевозке пригородных, пригородно-городских и внутригородских пассажиропотоков: с наличием глубокого (дальнего) перехода; с прямым (близким) переходом; с пересечением объектов.

Интеграция подсистем с глубоким переходом пассажиропотока. Этот вариант предусматривает наличие значительной по площади D_0 и длительной по времени T_0 буферной зоны. Вариант путевого развития и технического оснащения подсистем взаимодействия при данной интеграции представлен на рис. 1.

Представленная схема обеспечивает пересадку пассажиров с железной дороги на автотранспорт и наоборот при достаточном удалении устройств обоих видов транспорта друг от друга. Это связано со сложившейся инфраструктурой, которая развивалась относительно обособленно. Анализ подобных

схем показывает, что расстояние между пассажирской и автостанцией может составлять от 300 до 500 м, а время пересадки колеблется от 20 до 60 мин с учетом ожиданий отправления по железной дороге или автотранспортом. Зона перехода в этом случае не может рассматриваться как негативное следствие неудачного расположения объектов железной дороги и автомобильного транспорта. По пути следования пассажиров через зону глубокого перехода располагаются кафе, магазины, другие пункты бытового обслуживания (в том числе и развлечения) пассажиров, оборудованные места отдыха и пр. В данной зоне перехода могут размещаться входы на станцию метрополитена, а на пассажирскую станцию подаются поезда-аэроэкспрессы, которые обеспечивают доставку пассажиров в аэропорт и обратно.

Глубокий переход в данном случае следует рассматривать как накопитель пассажиропотока при поступлении пассажиров с автотранспорта на железнодорожный транспорт. Этот накопитель позволяет сгладить несообразность пассажиропотоков отдельных единиц подвижного состава автомобильного и железнодорожного транспорта. Благодаря наличию глубокого перехода ТПУ одновременно концентрирует пассажиропоток и распределяет его между различными видами транспорта. В зависимости от мощности перерабатываемого пассажиропотока требуются определенная площадь глубокого перехода и интервал времени для перехода пассажиров на другой вид транспорта.

Интеграция подсистем с близким переходом пассажиропотока. Близкий (прямой) переход пассажиров предполагает незначительное расстояние доступности второго вида транспорта при высадке из первого (от 200 до 300 м) и время пересадки от 10 до 20 мин. Анализ существующих схем позволяет сформировать типичную схему для такого способа транспортного обслуживания, которая представлена на рис. 2.

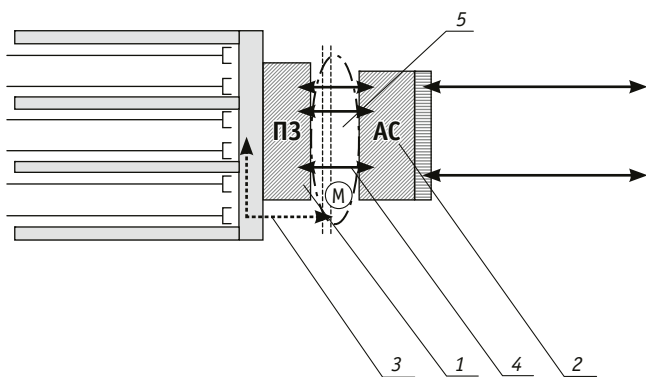


Рис. 2. Схема взаимодействия двух видов транспорта с интеграцией подсистем через близкий переход пассажиропотока:

- 1 — пассажирская станция;
 2 — автостанция с посадочными платформами;
 3 — пассажиропоток «железная дорога — метрополитен»;
 4 — пассажиропоток «железная дорога — автотранспорт»;
 5 — зона перехода

Зона перехода сокращается до расстояния, необходимо для раздельного сооружения зданий железнодорожного и автомобильного вокзалов, располагаемых, как правило, через привокзальную площадь. Перерабатываемый пассажиропоток возрастает до 100 000 человек в сутки и более. Особенностью данного способа интеграции взаимодействующих подсистем является меньшая ориентация на нетранспортное обслуживание пассажиров, так как из-за меньшей площади зоны перехода ($D_0 = 5000 \text{ м}^2$) отсутствует возможность полноценного комплекса устройств бытового и бизнес-обслуживания пассажиров. С другой стороны, это компенсируется большей пропускной способностью зоны перехода (примерно в 2 раза при сокращении площади зоны перехода в 1,5 раза).

Анализ различных существующих систем обслуживания пригородно-городских и пригородных пассажиров железнодорожным и автомобильным транспортом показывает, что зоны с близким переходом можно идентифицировать в тех случаях, когда устройства инфраструктуры взаимодействующих видов транспорта находятся в пределах прямой видимости. Выходящие пассажиропотоки железнодорожного и автомобильного транспорта после разделения больше нигде не пересекаются. Их изоляция достигается либо противоположным по отношению друг к другу движением (разнонаправленные пассажиропотоки), либо развязкой в разных уровнях (разноуровневые пассажиропотоки). Разноуровневые пассажиропотоки с близким переходом характерны для крупных городов с плотной застройкой городских кварталов и для мегаполисов со сложными развязками путей и дорог [9].

Привокзальная площадь для систем с близким переходом пассажиропотока одновременно служит объединяющим и разъединяющим объектом для двух видов транспорта. Практически такой симбиоз оказывается весьма органичным, обеспечивающим качественное транспортное обслуживание. Усиление транспортными развязками близкой зоны перехода позволяет увеличить пропускную способность данного узла взаимодействия до 100–150 тыс. пассажиров в сутки. Анализ ресурса та-

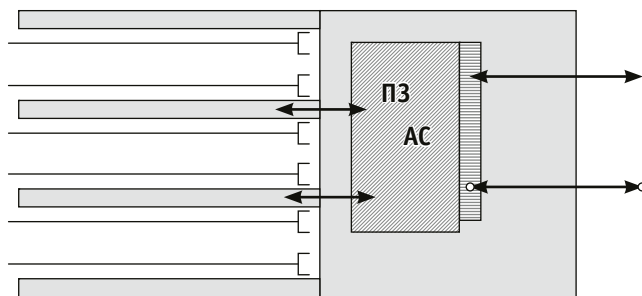


Рис. 3. Схема взаимодействия видов транспорта в совмещенном ТПУ

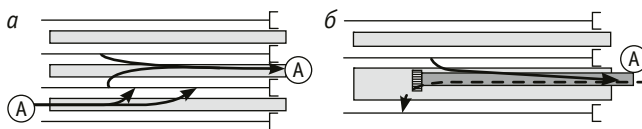


Рис. 4. Движение потоков пассажиров с различных видов транспорта:

а — в одном уровне; б — в двух уровнях

кой системы показывает, что плотность пассажиропотока при указанных нагрузках является предельной (до 3 чел./с на 1 м^2).

Интеграция подсистем с пересечением объектов взаимодействующих видов транспорта. Особенность технического обеспечения этих подсистем — совмещение в ТПУ железнодорожного и автомобильного транспорта с минимальным расстоянием доступности посадочной площадки (платформы) (200–100 м и менее) и общим временем пересадки менее 10 мин (рис. 3).

Минимальное время перехода на другой вид транспорта диктуется необходимостью развязки встречных пассажиропотоков, которые за сутки могут достигать 150–200 тыс. чел. и более. Движение пассажиров в обе стороны в совмещенном ТПУ приводит к сложной проблеме исключения пересечения пассажиропотоков, движущихся на платформы посадки и выходящих с них. Разработанные схемы предполагают одноуровневые и двухуровневые развязки пассажиропотоков (рис. 4).

Обе предлагаемые схемы могут обеспечивать высадку и посадку как в один пригородный состав, так и в различные, примыкающие к одной пассажирской платформе. При посадке пассажиров в один состав предполагается задержка пассажиропотока на время, необходимое для высадки других пассажиров (5–7 мин).

Развязки пассажиропотоков в ТПУ обязательно должны быть в разных уровнях. Количество уровней целесообразно определять исходя из числа видов транспорта, обеспечивающих пригородное или пригородно-городское движение в совмещенном ТПУ. Так, при наличии железной дороги, метрополитена и наземных городских пассажирских видов транспорта требуется проектирование трех уровней развязки пассажиропотока независимо от мощности каждого из них. В некоторых случаях можно не размещать различные пассажиропотоки в вертикальных уровнях, а если позволяют площади ТПУ, то изолировать их друг от друга в горизонтальных тоннелях [10].

В зависимости от потребного к обслуживанию пригородно-городского или пригородного пассажиропотока можно реко-

мендовать соответствующую схему и техническое оснащение комплекса устройств. Однако если в процессе работы существенно изменяется пассажиропоток и наблюдается устойчивая тенденция к росту или падению объемов пригородно-городского и пригородного движения, то существующий комплекс станет неэффективным для достижения требуемого уровня транспортного обслуживания. Такие ситуации можно избежать, если уже на стадии проектирования закладывать соответствующие резервы на перспективу. В крупных транспортных узлах мегаполисов всегда нужно сооружать интегрированные транспортные системы взаимодействующих видов транспорта с объединенными функциями основных объектов (вокзалов, пассажирских платформ). Рядом с такими комплексами должна резервироваться территория из расчета не менее $0,5 \text{ м}^2$ на каждого обслуживаемого пассажира за сутки. Основная идея этого предложения заключается в том, что при падении пассажиропотока на свободных прилегающих площадях закладывается инфраструктура для более широкой сферы услуг, чем только транспортное обслуживание. Осуществляется плановый переход с третьей на вторую или первую схемы, а усиливающийся ассортимент услуг ослабит тенденции снижения пассажиропотока. Возможен даже такой колебательный процесс снижения/роста пригородного пассажиропотока при оперативном включении и выключении режима близкого перехода, изменяемого на функции совместного использования устройств единого комплекса двух видов транспорта.

Сопряжение переходов пассажира с одного вида транспорта на другой происходит не только предоставлением удобных мест продажи проездных билетов, комфортного ожидания посадки, но и всех возможных услуг, которые могут потребоваться пассажиру. Естественно, чем больше по времени он находится в пункте пересадки, тем больший перечень других услуг должен быть ему предоставлен. Для 5–7 мин между прибытием поезда и отправлением автобуса большой ассортимент услуг окажется невостребованным.

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

Александр Константинович Головнич,

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Общетеchnические и специальные дисциплины», главный научный сотрудник испытательного центра железнодорожного транспорта Белорусского государственного университета транспорта

Надежда Юрьевна Евреенова, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта

Понятие плавности сопряжения перехода пассажира включает в себя также психологический фактор смены внимания с проблем переезда в пункт назначения минутами отдыха, что в полном объеме предоставляют соответствующие пункты, находящиеся по пути следования пассажира к другому виду транспорта. В результате снимается транспортная усталость.

Но главная причина необходимости в плавном сопряжении перехода от одного вида транспорта к другому (в данном случае — от автомобильного к железнодорожному и обратно) заключается в том, что требуется определенное время T_0 от момента высадки пассажира из вида транспорта X_i до посадки в вид транспорта X_j . Нельзя реализовать эффективную схему обслуживания пригородного пассажиропотока на станции пересадки с $T_0 = 0$ из-за признания хотя бы того факта, что посадка-высадка людей — это не погрузка-выгрузка грузов, и прямой вариант для пассажиропотока, исчисляемого тысячами и десятками тысяч человек, физически и морально не подходит. При очень большом пассажиропотоке (более 200 тыс. чел./сут) время перехода сжимается до минимума, и приходится идти на определенные жертвы качества бытового и другого нетранспортного обслуживания.

При этом следует отметить, что остается еще одно направление исследования, когда сфера нетранспортного обслуживания в пункте пересадки не зависит от величины пассажиропотока (инвариантность сферы обслуживания в пункте пересадки) и возрастает с увеличением пассажиропотока (прямая связь сферы обслуживания и величины пассажиропотока в пункте пересадки).

Нетранспортный (или надтранспортный) критерий качества обслуживания пассажиров в пункте взаимодействия железнодорожного и автомобильного транспорта достигает максимума именно в схемах с обратной связью сферы обслуживания и величины пригородного пассажиропотока, которые были рассмотрены выше.

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

Alexander K. Golovnich,

DSc in Engineering, Associate Professor, Professor of General Technical and Special Disciplines Department, Chief Scientific Officer of the Testing Center, Belarusian State University of Transport

Nadezhda Yu. Evreenova, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Transportation Business and Intelligent Systems Management Department, Russian University of Transport

Литература

1. Власов Д. Н. Транспортно-пересадочные узлы : монография. Москва : Московский государственный строительный университет ; «Ай Пи Эр Медиа» ; «ЭБС АСБ», 2017. 192 с.
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. Азаренкова З. В. Транспортно-пересадочные узлы в планировке городов : монография. Москва : ОАО «Типография «Новости», 2011. 96 с.
5. СП 42.13330.2016 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89*.
6. Вакуленко С. П., Евреенова Н. Ю. О классификации транспортно-пересадочных узлов // Мир транспорта. 2011. Т. 9. № 5 (38). С. 130–132. ISSN 1992-3252.
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.

References

1. Vlasov D. N. Transport interchange hubs : monograph. Moscow : Moscow Institute of Civil Engineering ; IPR Media ; EBS ASB, 2017. 192 p. (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. Azarenkova Z. V. Transport interchange hubs in planning of cities : monograph. Moscow : JSC «Printing House «Novosti», 2011. 96 p. (In Russian).
5. The Code of Rules 42.13330.2016. Urban development. Urban and rural planning and development. Building Codes and Regulations 2.07.01-89*. (In Russian).
6. Vakulenko S. P., Evreenova N. Yu. About classification of transport interchange hubs. *World of Transport and Transportation*. 2011. Vol. 9. No. 5 (38). Pp. 130–132. ISSN 1992-3252. (In Russian).
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 0,62 авторских листа

Научная статья

УДК 658.014

Исследование безопасности функционирования транспорта с разработкой модели оценки критериальных значений

Ольга Ивановна Веревкина¹, Владимир Эдуардович Иванов¹¹Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

Research of transport operation safety with development of a model for evaluation of criterial values

Olga I. Verevkina¹, Vladimir E. Ivanov¹¹Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

Аннотация

Статья посвящена оценке границ нарушений безопасности движения, вызванных неисправностью геометрии рельсовой колеи с точки зрения теории случайных потоков: событий — иницирующих факторов, с одной стороны, и «неустраненных» иницирующих факторов — с другой. Весь процесс анализируется как поток Эрланга большого порядка, что позволяет с заданной достоверностью оценить снизу длины интервалов между событиями, а далее с достаточной точностью — число событий и границы, в которых это число находится.

Ключевые слова: оценка риска, нарушение безопасности движения, показатель безопасности, поток Эрланга, расчет показателей

Abstract

In this paper the issue of estimating the boundaries of traffic safety violations due to faulty track geometry is considered from the point of view of the theory of random flows: events — initiating factors on the one hand, and «unremoved» initiating factors on the other hand, leading to traffic safety violations. The whole process is analysed as a large-order Erlang flow, which makes it possible to estimate from below the lengths of intervals between events with a given reliability, and further to estimate with sufficient accuracy the number of events and the boundaries in which it is located.

Keywords: risk assessment, traffic safety violations, safety indicator, Erlang flow, calculation of indicators

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-67-71

ВВЕДЕНИЕ

Развитие систем анализа рисков делает чрезвычайно актуальными исследования, посвященные нормированию рисков, в частности нормированию интенсивности нарушений безопасности движения (НБД). При изучении этой задачи неизбежно встают вопросы о том, изменилась ли интенсивность нарушений, если в текущем периоде число НБД выросло на 50 %, вдвое или втрое. Дать ответы на поставленные вопросы позволяет анализ границ, в которых находится число НБД.

Исследованиями в данном направлении занимается ряд отечественных и зарубежных ученых [1–5]. Например, в работах [1, 2] для проверки гипотез о принадлежности потока событий тому или иному распределению применяются байесовские, в [3, 4] — статистические методы. При этом, как отмечено в [3], «реальный уровень безопасности движения выявляется только в процессе массовой эксплуатации подвижного состава. Если бы статистика катастроф, аварий и случаев брака была неограниченной, то оценки показателей безопасности движения соответствовали бы истинным значениям, и задача оценки реального уровня безопасности движения поездов нормируемому решалась бы просто. Реально такая статистика ограничена, причем очень существенно. Поэтому оценки показателей безопасности движения содержат большой элемент случайности, и оценить соответствие реального уровня безопасности нормируемому можно только в вероятностном смысле». В этой же работе предложена методика оценки степени опасности с заданной доверительной вероятностью неблагоприятных факторов, которая базируется на определении доверительных границ с помощью функции распределения Фишера — Снедекора.

Поскольку безопасность — одна из основных характеристик качества перевозок, то методы исследований в области безопасности, включая статистические, первоначально были заимствованы и развивались в интересах оценки качества [6–10].

Объектом нашего исследования является количественная оценка числа сходов в поездной работе ОАО «РЖД» по ответственности Дирекции инфраструктуры по одному из факторов риска — своевременному выявлению неисправностей геометрии рельсовой колеи (ГРК).

Средством исследования в данном случае служит теория случайных потоков событий, а именно потоков Эрланга [11–14]. Эта модель применима к оценке характеристик процесса выявления и устранения неисправностей ГРК, поскольку, как и в случае с потоком Эрланга, процесс возникновения НБД по данной причине связан с невыявлением, а следовательно, с неустранением иницирующего фактора возникновения НБД. Иными словами, устраняется определенное число неисправностей, затем идет пропуск, затем вновь устраняется то же число неисправностей и т.д.

Каждому реальному процессу выявления неисправностей ГРК на полигоне можно поставить в соответствие некоторый поток Эрланга с такими же числовыми характеристиками. Поэтому теория потоков Эрланга применяется для рассмотрения потока выявления неисправностей ГРК и остаточного потока НБД в целом по сети железных дорог ОАО «РЖД». Конкретные данные по эксплуатационным факторам риска и потоку НБД взяты за период 2011–2015 гг.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пользуясь теорией потоков Эрланга, будем оценивать границы числа НБД в единицу времени (год).

Принимаем следующие предположения:

1) первоначальный поток событий считаем простейшим (потоком Пальма) [6] с интенсивностью λ , а событие выявления неисправности ГРК 3-го уровня будем ассоциировать с точками на прямой времени (t);

2) из потока выбрасываем k точек, $k+1$ -ю точку пропускаем, затем удаляем следующие k точек и т.д.

Известно [12], что закон распределения величины интервала между точками в потоке Эрланга k -го порядка имеет плотность

$$f_k(t) = \frac{\lambda(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

Характеристики потока — математическое ожидание, дисперсию, среднеквадратическое отклонение — определяем по формулам:

$$m_k = \frac{k+1}{\lambda}; \quad (2)$$

$$\sigma_k = \frac{\sqrt{k+1}}{\lambda}, \quad (3)$$

где m_k — математическое ожидание потока Эрланга k -го порядка; σ_k — среднеквадратическое отклонение потока Эрланга k -го порядка; λ — интенсивность потока.

Плотность потока задаем величиной, обратной математическому ожиданию:

$$\Lambda_k = \frac{\lambda}{k+1}. \quad (4)$$

Далее подставляем в формулы реальные значения k и λ . Особенность задачи заключается в том, что значение k очень близко к значению λ .

Как правило, в практике $k = [\lambda/n]$, где $n = 2-10$.

Вероятность отклонения величины интервала T от математического ожидания, согласно неравенству Чебышева, оценивается так:

$$P(|T - m_k| \geq \alpha \sigma_k) \leq \frac{\sigma_k^2}{\alpha \cdot \sigma_k^2}. \quad (5)$$

Например, при $\alpha = 3,16$ с достоверностью 0,9 (или 90 %) длина интервала находится в пределах

$$m_k - 3,16\sigma_k \leq T \leq m_k + 3,16\sigma_k. \quad (6)$$

Количество событий в результирующем потоке Эрланга в единицу времени будем оценивать величиной

$$\frac{1}{m_k + \alpha \sigma_k} \leq \Lambda_k \leq \frac{1}{m_k - \alpha \sigma_k}. \quad (7)$$

Возьмем отношения левой и правой части неравенства (7) к величине $\frac{1}{m_k}$ и получим слева $\frac{m_k}{m_k + \alpha \sigma_k}$, а справа $\frac{m_k}{m_k - \alpha \sigma_k}$.

Подставляя значения $k = [\lambda/n]$ в (2) и (3), получаем выражения для табуляции разброса значений невыявленных отклонений ГРК.

Верхняя граница (в единицах матожидания) рассчитывается по формуле

$$G_h = \frac{[\lambda/n] + 1}{[\lambda/n] + 1 - \alpha \cdot \sqrt{[\lambda/n] + 1}},$$

а нижняя граница (в единицах матожидания) — по формуле

$$G_L = \frac{[\lambda/n] + 1}{[\lambda/n] + 1 + \alpha \cdot \sqrt{[\lambda/n] + 1}}.$$

Здесь $[\]$ — целая часть числа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты расчета и табуляции этих функций при $\alpha = 3,16$ (значимость 0,9) для различных λ и n приведены в табл. 1 и 2 и на рис. 1 и 2.

На основе статистических данных эксплуатационной работы по неисправностям ГРК 4-й степени, представленных в табл. 3 (графы 2 и 3), где в качестве интенсивности первоначального потока используются данные 2-го столбца, а в качестве интенсивности результирующего потока данные 3-го столбца, рассчитываем интервал, в котором находится интенсивность результирующего потока сходов в поездной работе. Результаты расчета приведены в графе 4 табл. 3 и 4.

Из табл. 3 и 4 видно, что при приведенных интенсивностях потока событий результаты по потоку сходов в поездной работе находятся в границах от 4 до 10, в то время как среднее значение за период 2012–2015 гг. равно 8 (по ответственности Центральной дирекции инфраструктуры). Результат 2012 г. (т.е. значение 4), когда автоматизированная система тестировалась в реальном режиме, можно не принимать во внимание.

Таблица 1

Результаты расчета верхней границы количества НБД по отношению к среднему

λ/n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1000	1,111	1,164	1,209	1,249	1,287	1,324	1,359	1,392	1,426
2000	1,076	1,111	1,139	1,164	1,187	1,209	1,230	1,249	1,268
3000	1,061	1,089	1,111	1,130	1,148	1,164	1,180	1,195	1,209
4000	1,053	1,076	1,095	1,111	1,126	1,139	1,152	1,164	1,176
5000	1,047	1,067	1,084	1,098	1,111	1,123	1,134	1,145	1,155
6000	1,043	1,061	1,076	1,089	1,100	1,111	1,121	1,130	1,139
7000	1,039	1,056	1,070	1,082	1,092	1,102	1,111	1,120	1,128
8000	1,037	1,053	1,065	1,076	1,086	1,095	1,103	1,111	1,119
9000	1,034	1,049	1,061	1,071	1,080	1,089	1,097	1,104	1,111
10000	1,033	1,047	1,058	1,067	1,076	1,084	1,091	1,098	1,105

Таблица 2

Результаты расчета нижней границы количества НБД по отношению к среднему

λ/n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1000	0,909	0,876	0,853	0,834	0,818	0,804	0,791	0,780	0,770
2000	0,934	0,909	0,891	0,876	0,864	0,853	0,843	0,834	0,825
3000	0,945	0,925	0,909	0,897	0,886	0,876	0,868	0,860	0,853
4000	0,952	0,934	0,920	0,909	0,900	0,891	0,883	0,876	0,870
5000	0,957	0,941	0,928	0,918	0,909	0,901	0,894	0,888	0,882
6000	0,961	0,945	0,934	0,925	0,916	0,909	0,903	0,897	0,891
7000	0,964	0,949	0,939	0,930	0,922	0,915	0,909	0,904	0,898
8000	0,966	0,952	0,942	0,934	0,927	0,920	0,915	0,909	0,904
9000	0,968	0,955	0,945	0,938	0,931	0,925	0,919	0,914	0,909
10000	0,969	0,957	0,948	0,941	0,934	0,928	0,923	0,918	0,913

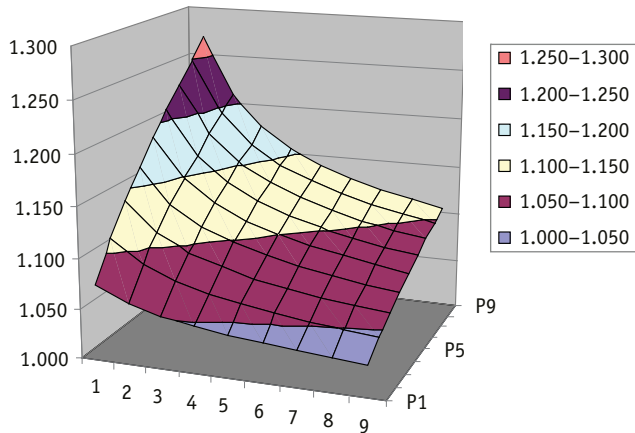


Рис. 1. Диаграмма результатов расчета по таблице 1

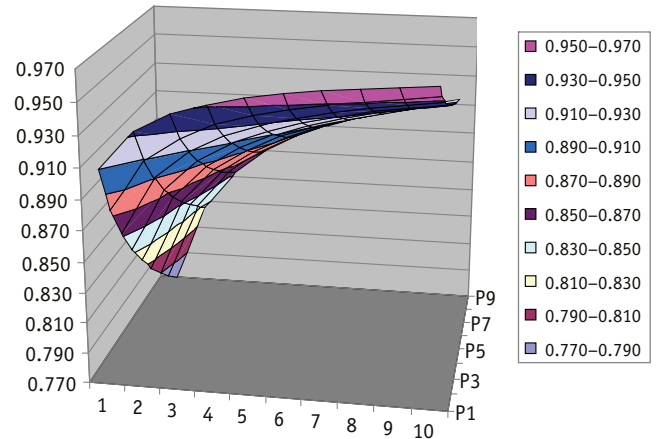


Рис. 2. Диаграмма результатов расчета по таблице 2

Таблица 3

Данные статистики эксплуатационной работы и результаты расчета границ интервалов для $\alpha = 3,16$ (достоверность $p = 0,9$)

Год	Количество ГРК 4-й степени	Количество сходов в поездной работе	Нижняя/верхняя границы интервала	Границы, %
1	2	3	4	5
2012	4918	4	3,67/4,40	91,7/109,9
2013	5272	10	8,79/11,59	87,9/115,9
2014	5718	9	8,00/10,29	88,9/114,3
2015	6833	9	8,07/10,29	89,7/112,9

Таблица 4

Результаты расчетов границ интервалов при $\alpha = 5$ (достоверность $p = 0,96$)

Год	Количество ГРК 4-й степени	Количество сходов в поездной работе	Нижняя/верхняя границы интервала	Границы, % от центрального значения
1	2	3	4	5
2012	4918	4	3,50/4,67	87,5/116,6
2013	5272	10	8,21/12,78	82,1/127,8
2014	5718	9	7,51/11,23	83,5/124,7
2015	6833	9	7,62/10,99	84,6/122,2

Выводы

Как показывает выполненный расчет, с точки зрения теории потоков количество сходов в поездной работе может колебаться в определенных пределах (оцениваемых от 92 до 115 %), что относится только к сходам по причине неисправностей рельсовой колеи при одной и той же интенсивности потока неисправностей ГРК 4-й степени. Общий разброс может оцениваться в пределах от 85 до 120 % от текущего среднего значения сходов в поездной работе. Все это указывает на то, что при выполнении заданий согласно стратегии гарантированной безопасности движения по снижению эксплуатационных факторов риска реально сократить риски можно при уменьшении показателя на 15 %. В то же время увеличение количества сходов менее чем на 20 % не говорит об ухудшении состояния безопасности движения. С другой стороны, уменьшение количества

сходов более чем на 15 % может указывать на реальное снижение риска, а их увеличение более чем на 20 % — на возрастание рисков и ухудшение состояния безопасности движения поездов. Учет колебаний внутри приведенного интервала имеет важное значение для повышения общей культуры безопасности.

Следует отметить, что установленные границы являются критериальными (пороговыми) значениями, позволяющими делать выводы об изменении или стационарности каждого из показателей риска возникновения того или иного вида нарушения безопасности движения. Поскольку показатель безопасности является одним из составляющих качества функционирования транспортной системы, то рассмотренный метод оценки границ можно отнести к числу инструментов, позволяющих определить, улучшилось или ухудшилось качество работы транспортной системы.

Сведения об авторах:

Ольга Ивановна Веревкина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Ростовского государственного университета путей сообщения

Владимир Эдуардович Иванов, аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» Ростовского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Olga I. Verevkina, PhD in Engineering, Associate Professor of Operational Work Management Department, Rostov State Transport University

Vladimir E. Ivanov, postgraduate student of Automation and Telemechanics in Railway Transport Department, Rostov State Transport University

Литература

1. Лисенков В. М. Статистическая теория безопасности движения поездов. Москва : ВНИТИ РАН, 1999. 332 с.
2. Лисенков В. М., Бестемьянов П. Ф. Методика сравнения реального уровня безопасности движения поездов с нормируемым // Безопасность движения поездов : труды второй научно-практической конференции. Кн. 1. Москва : Изд-во МИИТ, 2000. С. II-12–II-14.
3. Бестемьянов П. Ф. Методы повышения безопасности микропроцессорных систем интервального регулирования движения поездов : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва : МИИТ, 2001. 324 с.
4. Петрович М. И., Давидович М. И. Статистическое оценивание и проверка гипотез на ЭВМ. Москва : Финансы и статистика, 1989. 191 с.
5. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ. Москва : Мир, 1982. 488 с.
6. Фейгенбаум А. Контроль качества продукции. Москва : Экономика, 1986. 471 с.
7. Фишберн П. Методы оценки аддитивных ценностей. В кн. : Статистическое измерение качественных характеристик. Москва : Статистика, 1972. С. 8–34.
8. Козловский В. Н., Афиногентова Н. В., Заятров А. В. Методика ранжирования проблем качества высокотехнологичной продукции машиностроения по экономическим критериям // Актуальные проблемы экономики. 2016. № 3. С. 329–344. ISSN 1993-6788.
9. Айдаров Д. В. Развитие теории и практики управления конкурентоспособностью в автомобилестроении на основе ме-

References

1. Lisenkov V. M. Statistical theory of the safety of train traffic. Moscow : VINITI RAS, 1999. 332 p. (In Russian).
2. Lisenkov V. M., Bestem'yanov P. F. Methods of the comparison of the real level of safety of train traffic with the normalized one. *Train traffic safety : proceedings of the 2nd scientific and practical conference*. Book 1. Moscow : MIIT, 2000. Pp. II-12–II-14. (In Russian).
3. Bestem'yanov P. F. Methods to increase safety of microprocessor systems of interval train traffic regulation : Synopsis of DSc in Engineering Thesis. Moscow : MIIT, 2001. 324 p. (In Russian).
4. Petrovich M. I., Davidovich M. I. Statistical evaluation and computer hypothesis testing. Moscow : Finance and Statistics, 1989. 191 p. (In Russian).
5. Afifi A., Azen S. Statistical analysis: a computer oriented approach. Moscow : World, 1982. 488 p. (In Russian).
6. Feigenbaum A. *Quality control*. Moscow : Economy, 1986. 471 p. (In Russian).
7. Fishbern P. Methods of evaluation of additive values. In book: *Statistical measurement of qualitative characteristics*. Moscow : Statistics, 1972. Pp. 8–34. (In Russian).
8. Kozlovskiy V. N., Afinogenova N. V., Zayatrov A. V. Methodology for quality problems ranking for high-tech products in engineering by economic criteria. *Current Problems of Economy*. 2016. No. 3. Pp. 329–344. ISSN 1993-6788. (In Russian).
9. Aydarov D. V. The development of the theory and practice of competitiveness management in automobile industry on the bases of the methodology of the consumer value quality : DSc in Engineering Thesis. Samara, 2020. 244 p. (In Russian).

- тодологии потребительской ценности качества : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Самара, 2020. 244 с.
10. Концепция цифровой среды поддержки управления конкурентоспособностью / В. Н. Козловский, Д. В. Айдаров, Д. И. Панюков, М. М. Васильев // Стандарты и качество. 2018. № 6. С. 86–89.
 11. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Москва : Высшая школа, 2001. 576 с.
 12. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. Москва : Наука, 1985. 121 с.
 13. ГОСТ Р ИСО 22514-7-2014. Статистические методы. Управление процессами. Часть 7. Воспроизводимость процессов измерений. Москва : Стандартиформ, 2015. 40 с.
 14. ГОСТ Р ИСО 7870-1-2011. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 1. Общие принципы. Москва : Стандартиформ, 2012. 16 с.
 10. Kozlovskiy V. N., Aydarov D. V., Panyukov D. I., Vasilyev M. M. Concept of a digital environment to support competitiveness management. *Standards and Quality*. 2018. No. 6. Pp. 86–89. (In Russian).
 11. Ventsel E. S. Probability theory. Moscow : Higher School, 2001. 576 p. (In Russian).
 12. Ventsel E. S., Ovcharov L. A. Theory of stochastic processes and its engineering applications. Moscow : Science, 1985. 121 p. (In Russian).
 13. GOST R ISO 22514-7-2014. Statistical methods. Process management. Part 7. Capability of measurement processes. Moscow : Standardinform, 2015. 40 p. (In Russian).
 14. GOST R ISO 7870-1-2011. Statistical methods. Control charts. Part 1. General guidelines. Moscow : Standardinform, 2012. 16 p. (In Russian).

Объем статьи 0,44 авторских листа

Научная статья
УДК 621.39

Исследование применения LoRa-модуляции на железнодорожном транспорте

Антон Николаевич Попов¹, Илья Дмитриевич Вершинин¹

¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

Research on the application of LoRa modulation in railway transport

Anton N. Popov¹, Ilya D. Vershinin¹

¹Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

В статье рассмотрена возможность применения интернета вещей (IoT) на железнодорожном транспорте, в частности модуляции Long Range (LoRa). Анализируются преимущества и недостатки использования данного вида модуляции на железнодорожном транспорте. Описан принцип работы линейно-частотной модуляции, применяемой в технологии LoRaWAN. Приведены формулы для расчета потерь мощности радиосигнала на трассе и определения уровня полезного сигнала в зависимости от расстояния до базовой станции LoRa. Приведен расчет дальности гарантированного приема сигнала в зависимости от спред-фактора. Расчеты выполнены с использованием эмпирической модели Хата, по результатам построен график зависимости уровня полезного сигнала от расстояния до базовой станции.

Ключевые слова: интернет вещей, Long Range, LoRaWAN, радиосвязь, модель Хата

Abstract

The article considers the possibility of using Internet of Things (IoT) technology in railway transport, and considers Long Range modulation (LoRa). The advantages and disadvantage for use of this type of modulation in railway transport are analyzed. The principle of operation of linear frequency modulation used in LoRaWAN technology is considered. Formulas are given for calculating the power loss of the radio signal on the radio path, as well as other parameters for determining the level of the useful signal depending on the distance of the LoRa base station. The range of action is considered depending on the spread factor. The calculations were carried out using the empirical Hata model and adapted for the railway station. Based on the results of mathematical calculations, a graph of the dependence of the useful signal level on the distance of the base station is constructed.

Keywords: Internet of Things, Long Range, LoRaWAN, radio communication, Hata model

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-72-75

Развитие железнодорожного транспорта, задачи по повышению безопасности и пропускной способности магистралей требуют внедрения новых технологий для совершенствования управления объектами строгой отчетности и инфраструктуры.

В настоящее время все большее число предприятий используют для этих целей технологию интернета вещей (IoT). Интернет вещей представляет собой концепцию, описывающую сеть физических предметов (вещей), оснащенных базовыми станциями, датчиками, исполнительными устройствами и обладающих способностью к обмену информацией через цифровые сети связи. Идея технологии IoT заключается в том, что объекты могут собирать информацию о своем состоянии и окружающей среде, обмениваться данными с другими устройствами и системами через сеть, а значит, осуществлять удаленный мониторинг.

Сегодня существует множество различных стандартов беспроводных IoT-сетей. Например, в Российской Федерации распространены NB-IoT и LoRaWAN. NB-IoT — это стандарт сотовой связи для устройств телеметрии с низким потреблением электроэнергии и малыми объемами передаваемой информации. LoRaWAN — технология на основе открытого стандарта LPWAN, которая позволяет создавать как частные, так и общедоступные IoT-сети независимо от сотовых операторов. В отличие от NB-IoT, LoRaWAN использует нелицензируемый диапазон частот, что дает возможность разрабатывать свои собственные сети без необходимости их лицензировать.

Сети LoRaWAN являются перспективным решением для мониторинга и управления на железнодорожном транспорте за счет большой дальности действия базовых станций и малого потребления электроэнергии объектов интернета вещей. К числу главных факторов, делающих LoRaWAN привлекательным для использования на железнодорожном транспорте Российской Федерации, относятся нелицензируемый диапазон частот 868,7–869,2 МГц, позволяющий снизить потенциальные расходы при лицензировании, и большая дальность действия базовой станции. В частности, одна базовая станция может передавать и принимать данные на расстоянии от 30 до 50 км. Дальность действия зависит от количества устройств в радиусе действия (чем больше устройств, тем медленнее будет ра-

ботать сеть), а также от рельефа местности, высоты установки базовой станции, высоты нахождения датчика и загрязненности радиозфира в используемом диапазоне. В некоторых ситуациях при использовании протокола LoRaWAN удается передавать данные на расстояния более 700 км, такие показатели достигаются за счет одночастотных антенн, а также за счет подъема устройства на большую высоту [1].

Несмотря на то что LoRaWAN не имеет высоких скоростей (варьируются от 300 бит/с до 50 кбит/с), они могут быть достаточными для передачи небольшого количества данных от объектов, например данных о скорости движения локомотива или состоянии открытия или закрытия двери. Рассматриваемая технология является узкополосной с полосой в 125 кГц. Частота изменяется в рамках одного частотного канала шириной 125 кГц, который разделен в соответствии со спецификацией сети LoRaWAN на 128 промежуточных частотных отрезков. Для передачи символа происходит обрыв цикла на одной из промежуточных частот (рис. 1), который кодирует передаваемый символ. Таким образом, при использовании 128 промежуточных частотных отрезков в каждом канале можно закодировать 128 символов.

Модуляция LoRaWAN базируется на линейно-частотной модуляции (Chirp), на рис. 2 представлен пример передачи сигнала в сетях LoRaWAN.

В LoRaWAN модуляция заключается в обрыве цикла одной из промежуточных частот и начале нового цикла, что является кодированием передаваемого символа. Кроме того, в стандарте определены коэффициенты расширения спектра (Spreading factor), представляющие собой зависимость между временем и изменением частоты в линейно-частотной модуляции. Чем выше коэффициент, тем медленнее изменяется частота. Соответственно при снижении скорости изменения частоты падает скорость передачи данных, но при этом повышается помехоустойчивость системы передачи, на рис. 3 представлен график модулированного линейно-частотного сигнала LoRaWAN [2].

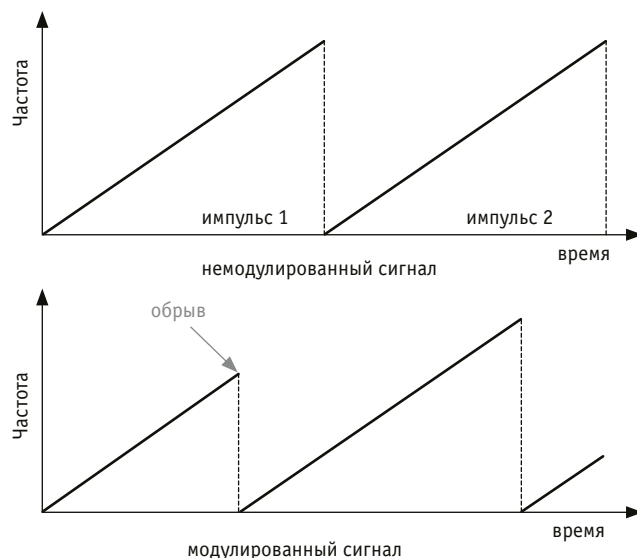


Рис. 1. Модуляция в сети LoRaWAN

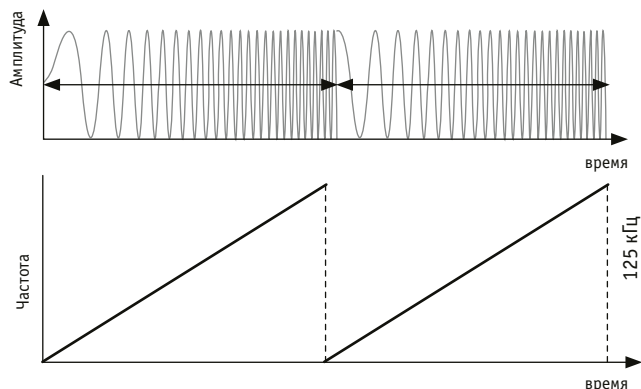


Рис. 2. Сигнал LoRaWAN

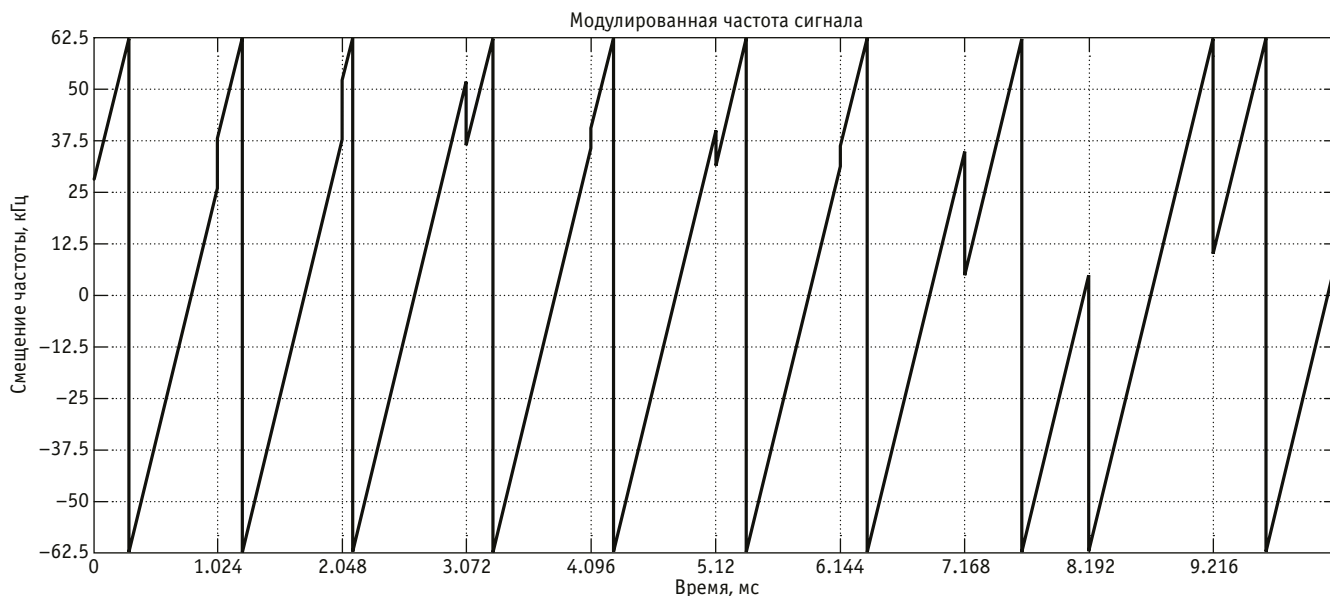


Рис. 3. Модулированный сигнал LoRaWAN

Ключевая особенность беспроводных сетей LoRaWAN состоит в высокой помехоустойчивости, которая достигается специальной модуляцией — линейно-частотной, при этом технология LoRa использует асинхронный режим приема — передачи [3].

Кроме высокой помехоустойчивости, как уже отмечалось, рассматриваемая технология имеет большую дальность действия, которая может быть рассчитана различными математическими моделями и алгоритмами распространения радиоволн для распространения сигналов в открытом пространстве. В статье будет рассматриваться эмпирическая модель Хата для расчета уровня сигнала.

Модель Хата представляет собой оценку распространения радиосигнала на различных частотах в зависимости от расстояния и частоты.

Основные параметры, учитываемые в модели:

частота передачи;

расстояние между передатчиком и приемником;

высота антенн передатчика и приемника;

тип местности.

Для расчета уровня сигнала на входе приемника в эмпирической модели воспользуемся формулой

$$Q = P - L - S, \quad (1)$$

где P — выходная мощность передатчика, дБ; L — потери на радиотрассе, дБ; S — запас по замираниям, дБ.

С использованием эмпирической модели Хата потери на радиотрассе можно определить по формуле

$$L = 69,55 + 26,16 \cdot \lg(f) - 13,82 \cdot \lg(H_{bs}) + [44,9 - 6,55 \cdot \lg(H_{bs})] \cdot \lg(r) + \alpha(h_{as}) + \alpha(U_r) + \alpha(b) + \alpha(H_{bs}, f), \quad (2)$$

где f — частота, МГц; H_{bs} — высота базовой станции, м; r — расстояние между базовой станцией и абонентским устройством, км; h_{as} — высота абонентской станции, м; $\alpha(h_{as})$ — коэффициент, учитывающий высоту антенны абонентской станции; $\alpha(U_r)$ — коэффициент, учитывающий характер местности (для города равен 1); $\alpha(b)$ — коэффициент, отражающий влияние плотности застройки; $\alpha(H_{bs}, f)$ — коэффициент, учитывающий сферичность Земли.

Коэффициент, учитывающий высоту антенны абонентской станции, определим по формуле

$$A(h_{as}) = (1 - U) \cdot [0,7 - 1,1 \cdot \log(f) \cdot h_{as} + 1,56 \cdot \lg(f) - 0,8] + U \times \left\{ \left[(1,1 - 8,29 \cdot \lg^2(1,54 \cdot h_{as})) \cdot \frac{300^4}{f^4 + 300^4} \right] + \left[(4,97 - 3,2 \cdot \lg^2(11,75 \cdot h_{as})) \cdot \frac{f^4}{f^4 + 300^4} \right] \right\}, \quad (3)$$

где U — коэффициент, учитывающий застройку местности ($U = 0$ для небольшого или среднего города, $U = 1$ для большого города).

Коэффициент, отражающий рельеф местности, рассчитаем следующим образом:

$$A(b) = 25 \cdot \log_{10}(b) - 30, \quad (4)$$

где b — коэффициент, учитывающий плотность застройки (3; 50).

В формуле (4) коэффициент 3 указывает на равнинную местность в зоне внедрения сети LoRa. Коэффициент 50 характеризует сложную местность или плотную городскую застройку.

Коэффициент, учитывающий сферичность Земли, определим по формуле

$$A(H_{bs}, f) = \left(27 + \frac{f}{230} \right) \cdot \lg \frac{17(H_{bs} + 20)}{17(H_{bs} + 20) + r^2} + 1,3 - \frac{f - 55}{750}. \quad (5)$$

Кроме частотной зависимости распространения сигнала и окружающих факторов в модуляции используется понятие спред-фактора (коэффициента расширения). Спред-фактор (SF) определяет, как широко распределены символы во времени. Чем выше спред-фактор, тем более длительный символ и, следовательно, более узкий полосовой интервал. SF влияет на минимальный уровень приема полезного сигнала, а также на скорость передачи информации [4].

Для определения минимального уровня приема (чувствительности) используем формулу

$$S = -174 + 10 \log_{10} BW + NF + SNR, \quad (6)$$

где BW — ширина канала; NF — показатель шума (для LoRa равен 6 дБ); SNR — отношение сигнал/шум.

Отношение сигнал/шум — это показатель, который применяется для оценки качества сигнала в системах связи. Он определяет, насколько мощность сигнала превышает мощность шума в канале связи. SNR зависит от спред-фактора, эта зависимость представлена в табл. 1 [5].

Таблица 1

Зависимость коэффициента расширения от SNR

Спред-фактор	Битовая скорость, Бит/с	SNR, дБ
7	5470	-7,5
8	3125	-10
9	1760	-12,5
10	980	-15
11	440	-17,5
12	290	-20

По результатам расчетов построен график зависимости уровня сигнала на входе приемника от удаленности в условиях железнодорожной станции (рис. 4). Применяемые параметры: частота несущей — 868 МГц, ширина полосы пропускания — 125 кГц, мощность базовой станции — 16 дБ, усиление штыревой антенны — 20 дБ, высота установки антенны — 30 м, высота абонентской станции — 2 м, запас на замирание — 34 дБ.

Из рис. 4, на котором приведены предельные уровни расчетной дальности для каждого спред-фактора, следует, что с повышением коэффициента расширения растет дальность принимаемого сигнала, но из-за увеличения времени передачи символа падает скорость. В сетях LoRa дальность, как правило, ограничивается минимальным уровнем принимаемого сигнала оконечного устройства и может быть увеличена за счет большей высоты установки антенны базовой станции или за счет использования направленной антенны (если устройства находятся в одном месте).

На основе выполненных расчетов построен график зависимости уровня сигнала на входе приемника на железнодорожной станции (см. рис. 4). Это даст возможность выполнять математический расчет устойчивого покрытия сети LoRa в границах железнодорожных станций.

В заключение отметим, что применение технологии LoRaWAN на железнодорожном транспорте представляет собой перспективное решение для мониторин-

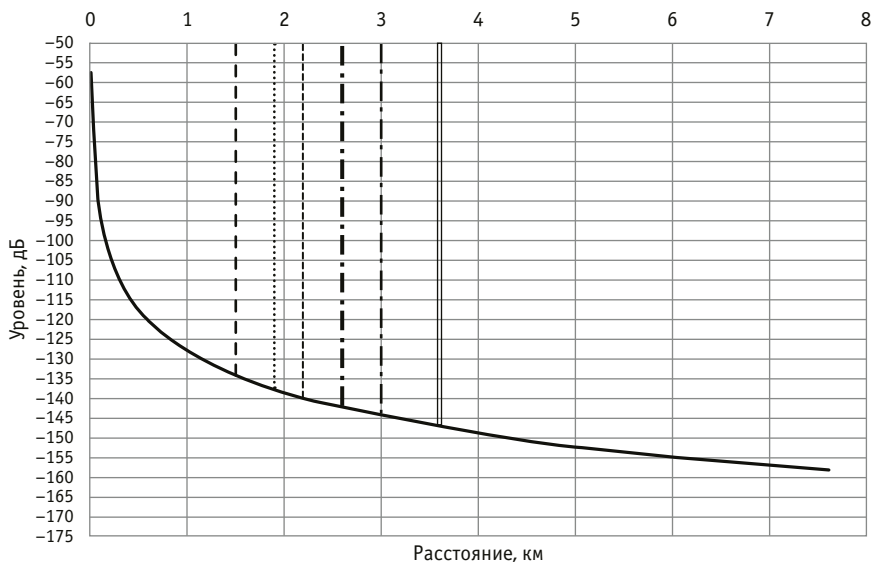


Рис. 4. График зависимости уровня принимаемого полезного сигнала на приемнике от расстояния до базовой станции:

— уровень сигнала на входе приемника, дБ;
- - - SF7; SF8; - - - - SF9; - · - · SF10; - · - SF11; — SF12

га объектов инфраструктуры [6]. Технология обладает такими преимуществами, как использование нелицензируемо-

го диапазона, низкое энергопотребление устройств и большая дальность действия, что делает ее гибкой и масштабируемой.

Сведения об авторах:

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

Илья Дмитриевич Вершинин, аспирант, ассистент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Anton N. Popov, PhD in Engineering, Associate Professor of Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport

Ilya D. Verшинin, postgraduate student, Assistant Lecturer of Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport

Литература

- 766 км — новый рекорд дальности для LoRaWAN. URL: <https://habr.com/ru/companies/1cloud/articles/465539/> (дата обращения: 13.10.2023).
- Экономов А. LoRaWAN как надежная и безопасная технология связи // *Connect*. 2020. № 1–2. С. 24–30.
- Шорин О. А., Бокк Г. О., Щепнов С. Г. Сравнение эффективности модуляции с расширением спектра сети LoRa и традиционной техники дискретной фазовой модуляции. Часть 1 // *Экономика и качество систем связи*. 2023. № 3 (29). С. 37–53. ISSN 2500-1833.
- Весоловский К. Системы подвижной радиосвязи. Москва: Горячая линия — Телеком, 2006. 536 с.
- Eigner H. *Interference Analysis of LoRaWAN Systems*. Wien: Institute of Electrodynamics, Microwave and Circuit Engineering, 2021. 83 p.
- Попов А. Н., Галинуров Р. З. Волоконно-оптические технологии в системах управления движением поездов и контроля состояния объектов инфраструктуры // *Транспорт Урала*. 2018. № 3 (58). С. 48–54. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-48-54.

References

- 766 km — the new range record for LoRaWAN. URL: <https://habr.com/ru/companies/1cloud/articles/465539/> (access date: 13.10.2023). (In Russian).
- Ekonomov A. LoRaWAN as a reliable and secure communication technology. *Connect*. 2020. No. 1–2. Pp. 24–30. (In Russian).
- Shorin O. A., Bokk G. O., Shchepnov S. G. Comparison of the modulation efficiency with the expansion of the LoRa network spectrum and the traditional technique of discrete phase modulation. Part 1. *Economics and quality of communication systems*. 2023. No. 3 (29). Pp. 37–53. ISSN 2500-1833. (In Russian).
- Vesolovski K. *Mobile radio communication systems*. Moscow: Hotline — Telecom, 2006. 536 p. (In Russian).
- Eigner H. *Interference Analysis of LoRaWAN Systems*. Wien: Institute of Electrodynamics, Microwave and Circuit Engineering, 2021. 83 p.
- Popov A. N., Galinurov R. Z. Fiber optic technologies in the automatic train control systems and monitoring of railway infrastructure. *Transport of the Urals*. 2018. No. 3 (58). Pp. 48–54. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-48-54. (In Russian).

Научная статья
УДК 656.025

Повышение эффективности работы пассажирской транспортно-логистической системы

Мария Юрьевна Карелина¹, Владимир Юрьевич Линник¹, Юлия Николаевна Ризаева², Александр Сергеевич Лукинов³

¹Государственный университет управления, Москва, Россия

²МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

³Департамент транспорта администрации города Липецка, Липецк, Россия

Improving efficiency of urban transit system

Maria Yu. Karelina¹, Vladimir Yu. Linnik¹, Yulia N. Rizaeva², Alexander S. Lukinov³

¹State University of Management, Moscow, Russia

²MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

³Lipetsk Department of Transportation of Administration of the city of Lipetsk, Lipetsk, Russia

Аннотация

В статье представлен комплексный анализ данных о количестве пассажиров, перевезенных по муниципальным маршрутам регулярных перевозок за 12 месяцев. Выполнено сравнение фактической выручки на маршрутах с расчетным показателем платы за проезд, определенным в соответствии с отраслевым нормативным документом. По результатам анализа предложено повысить эффективность пассажирской транспортно-логистической системы за счет снижения рисков переплаты или недофинансирования транспортных услуг.

Ключевые слова: пассажирские перевозки, эффективность, транспортная система, логистическая система

Abstract

The article presents a complexed data analyses concerning the number of passengers, transferred on municipal regular transportation routes during 12 months. A comparison of the factual profit on routes with an estimated indicator of transfer fare has been made, determined according to the sectoral regulations. On the results of the analyses it is proposed to increase the effectiveness of the logistics of passenger transportation system due to the risks reduction of overpayment or transportation service underfunding.

Key words: passenger transportation, efficiency, transport system, logistics system

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-76-84

Эффективность работы пассажирской транспортно-логистической системы определяется главным образом соотношением понесенных затрат занимаемого полезного городского пространства и показателей транспортной работы [1].

Затраты, необходимые для обеспечения надежного транспортного обслуживания населения, определяются с различной степенью детализации как на этапе транспортного планирования, так и на этапе проведения закупочных процедур с учетом выбранной модели взаимоотношений перевозчика, заказчика (организатора перевозок) и пассажира.

В статье [2] отмечается, что в истории появления и трансформации видов договоров на перевозки наблюдается ряд закономерностей, особенностей и противоречий, влияющих в конечном счете на текущее положение рынка пассажирских перевозок в российских городах и на результаты проводимых транспортных реформ.

В настоящее время, как закреплено в части 2 статьи 14 Федерального закона от 13.07.2015 г. № 220-ФЗ, регулярные перевозки пассажиров и багажа по регулируемым тарифам должны осуществляться в рамках исполнения государственных или муниципальных контрактов, заключенных в соответствии с законодательством Российской Федерации о контрактной системе [3].

Согласно части 22 статьи 22 Федерального закона № 44-ФЗ [4] и Постановлению Правительства Российской Федерации от 11.10.2016 г. № 1028 [5], приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 20.10.2021 г. № 351 [6] утвержден особый метод определения начальной (максимальной) цены контракта (НМЦК) на регулярные пассажирские перевозки по регулируемым тарифам, отличающийся от методов, указанных в части 1 статьи 22 Федерального закона № 44-ФЗ.

Приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 29.12.2018 г. № 482 установлено три вида типовых контрактов по видам оплаты [7]:

1) плата за проезд пассажиров, собранная с линии, перечисляется в распоряжение заказчика, а перевозчику оплачивается фактически выполненный объем работ по цене единицы работы, предусмотренной контрактом, по себестоимости с фиксированной рентабельностью (брутто-контракт);

2) плата за проезд пассажиров перечисляется в распоряжение подрядчика (перевозчика), а перевозчику оплачивается фактически выполненный объем работ по цене единицы работы, предусмотренной контрактом, по себестоимости с фиксированной рентабельностью за вычетом предусмотренных в бюджете субсидий и планируемой выручки с линии (нетто-контракт);

3) плата за проезд пассажиров остается в распоряжении подрядчика, оплата перевозчику по контракту осуществляется без учета цены единицы работы.

Приказом Министерства транспорта Российской Федерации № 351 [6] установлен порядок определения НМЦК для вышеперечисленных случаев: для первого типового контракта расчет осуществляется по формуле (1), для второго и третьего — по формуле (2), руб.:

$$\text{НМЦК} = \sum_{i=1}^k (C_i + C_{oi}) \cdot k_a; \quad (1)$$

$$\text{НМЦК} = \sum_{i=1}^k (C_i + C_{oi}) \cdot k_a - C_{\text{суб}} - \Pi, \quad (2)$$

где C_i — максимальная стоимость работы транспортных средств i -го класса за весь срок действия контракта; C_{oi} — затраты подрядчика на дополнительное оборудование транспортных средств; k_a — коэффициент, учитывающий расходы на оплату услуг автовокзалов и автостанций; $C_{\text{суб}}$ — размер субсидий, которые будут предоставлены подрядчику в целях компенсации недополученных доходов; Π — планируемая плата за проезд пассажиров и провоз багажа, оставляемая в распоряжении подрядчика; k — количество предусмотренных контрактом классов транспортных средств.

Таким образом, при выборе модели нетто-контрактов важное значение имеет показатель планируемой платы за проезд, которая поступит в распоряжение перевозчика. В случае существенного отклонения расчетного значения от фактического вероятен риск нерационального использования бюджетных средств или невозможности надлежащего исполнения контракта и, как следствие, ухудшения качества транспортного обслуживания населения. В [6] определен порядок расчета этого показателя, используемый всеми заказчиками при проведении закупок.

В 2022 г. в Липецке был осуществлен полный переход на контрактную систему пассажирских перевозок по модели нетто-контрактов, и в настоящее время накоплено достаточно данных для оценки эффективности существующей модели взаимоотношения заказчика, перевозчика и пассажира. При анализе этой модели нами использовались данные автоматизированной системы безналичной оплаты проезда на транспорте общего пользования, к которой присоединены все пе-

ревозчики Липецкой области, включая перевозчиков, обслуживающих муниципальные маршруты регулярных перевозок города Липецка.

Автоматизированная система безналичной оплаты проезда на транспорте Липецкой области предоставляет пассажирам возможность оплачивать проезд и перевозку багажа с помощью банковских карт, транспортных карт, в том числе пользоваться предусмотренными федеральным и региональным законодательством льготами. Система включает в себя пассажирский автомобильный и городской наземный электрический транспорт всей Липецкой области, обслуживается единым оператором. У каждого перевозчика заведен личный кабинет в системе, в котором можно отслеживать количество транзакций на каждом обслуживаемом маршруте и по каждому виду оплаты, а также размер субсидии, которая должна быть предоставлена перевозчику за перевозку льготных категорий граждан по сниженному тарифу. Что касается заказчиков транспортных услуг, им данные автоматизированной системы безналичной оплаты проезда необходимы для транспортного планирования и проведения конкурентных закупочных процедур на право обслуживания регулярных маршрутов.

Сводная база данных составлена за период 31.10.2022 г. — 31.10.2023 г., включает в себя более 177 тыс. строк, содержит сведения о количестве транзакций за сутки по каждому муниципальному маршруту и перевозчику.

В течение года суммарный пассажиропоток на маршрутной сети Липецка подвержен изменениям, явные снижения приходятся на выходные и праздничные дни (рис. 1). В будние дни количество перевозимых пассажиров колеблется в интервале от 200 тыс. до 250 тыс. чел. Если принять условие, что большинство поездок осуществляется без пересадок 2 раза в день (на работу и с работы), то количество уникальных пассажиров ориентировочно составляет 100–125 тыс. чел., или 20–25 % от численности населения города.

Сводная диаграмма (рис. 2) позволяет выбрать любого перевозчика, маршрут и период осуществления перевозок в установленном пределе. При помощи графика можно отслеживать изменения на рынке пассажирских перевозок и выявлять проблемные зоны.

Например, на рис. 3 показано изменение числа перевезенных пассажиров по муниципальному маршруту № 11. У перевозчика, обслуживающего маршрут, наблюдался острый дефицит водительских кадров, в связи с чем отсутствовала возможность обеспечить плановый выпуск подвижного состава на всех обслуживаемых маршрутах, в том числе на маршруте № 11. В июле 2023 г. в связи с большим количеством жалоб, поступивших от населения, было принято решение о расторжении одного из муниципальных контрактов с этим перевозчиком, что позволило ему консолидировать имеющиеся ресурсы для обслуживания оставшихся маршрутов. В результате с июля 2023 г. регулярность движения по маршруту существенно (практически в 2 раза) выросла, число перевозимых пассажиров увеличилось, тем самым удалось снизить социальную напряженность и повысить доход от перевозок.

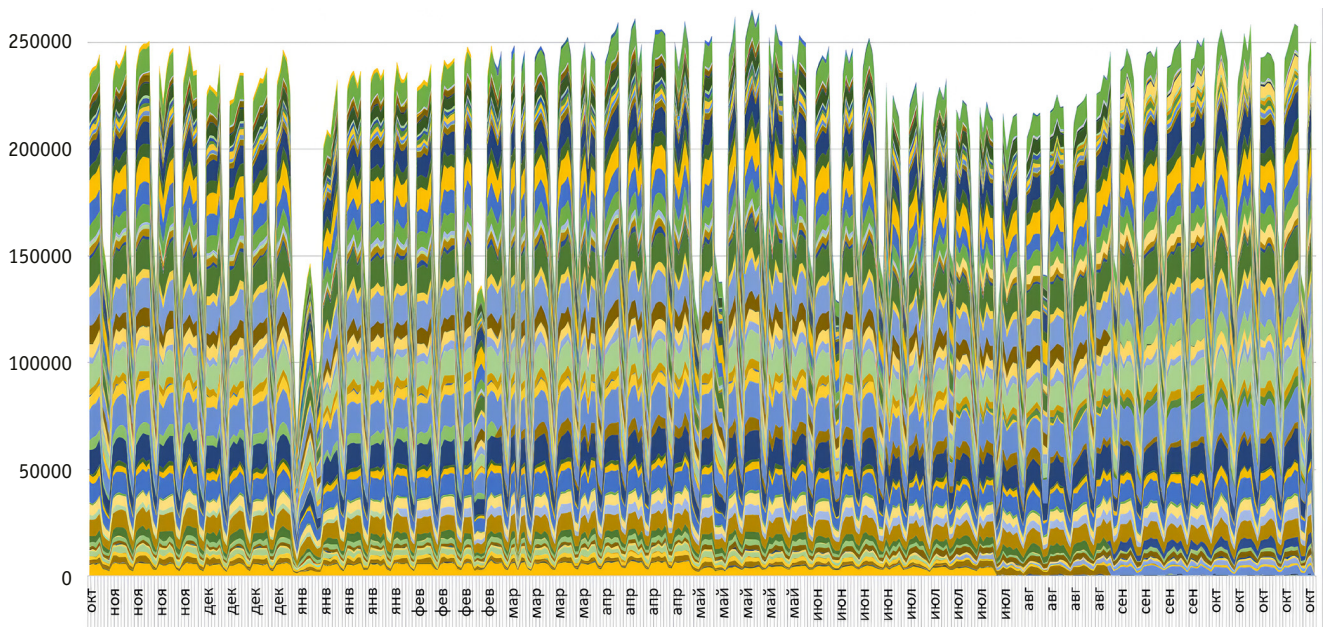


Рис. 1. Сводная диаграмма количества перевезенных пассажиров с накопительным итогом

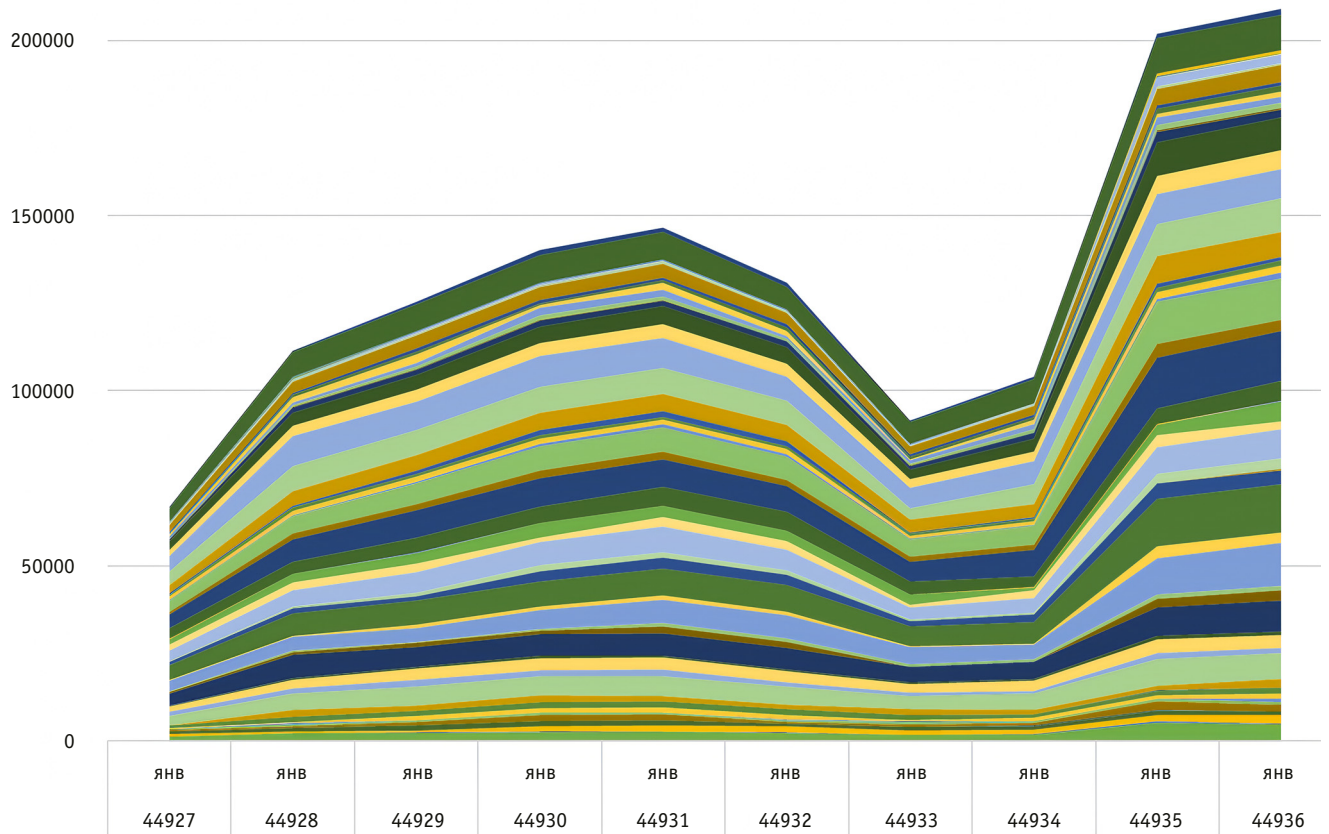


Рис. 2. Фрагмент сводной диаграммы количества перевезенных пассажиров с накопительным итогом за период 01.01.2023–10.01.2023 г.

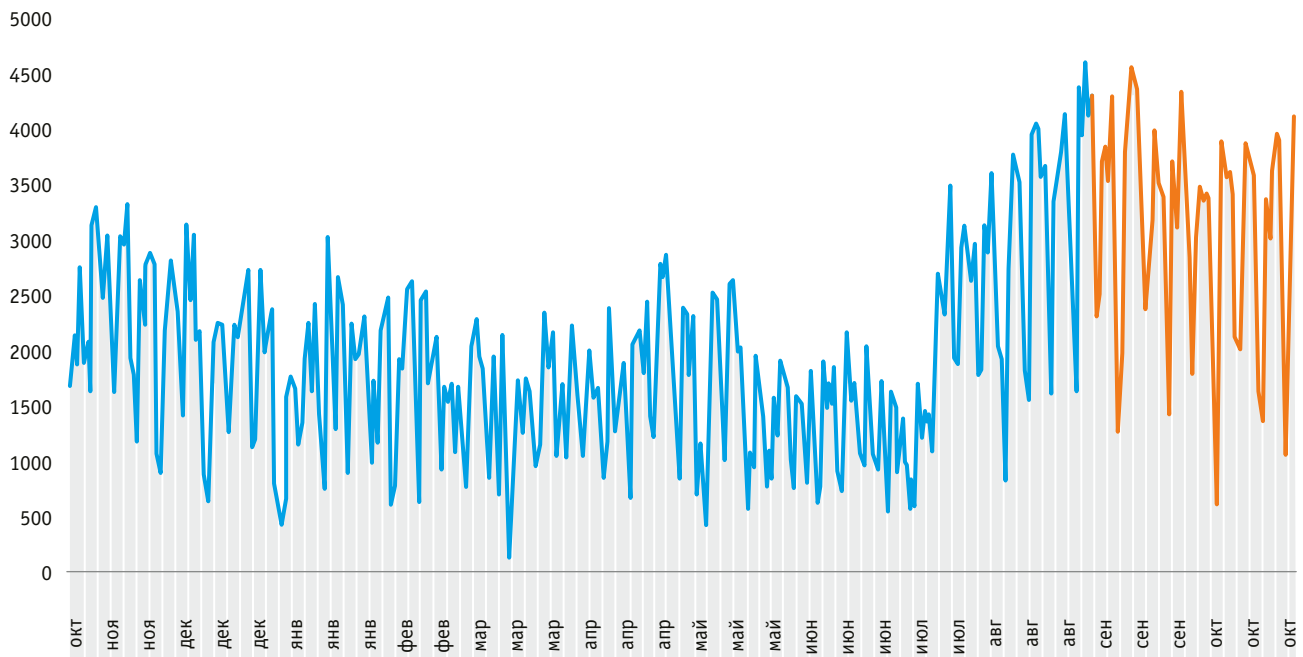


Рис. 3. Диаграмма количества перевезенных пассажиров по муниципальному маршруту № 11

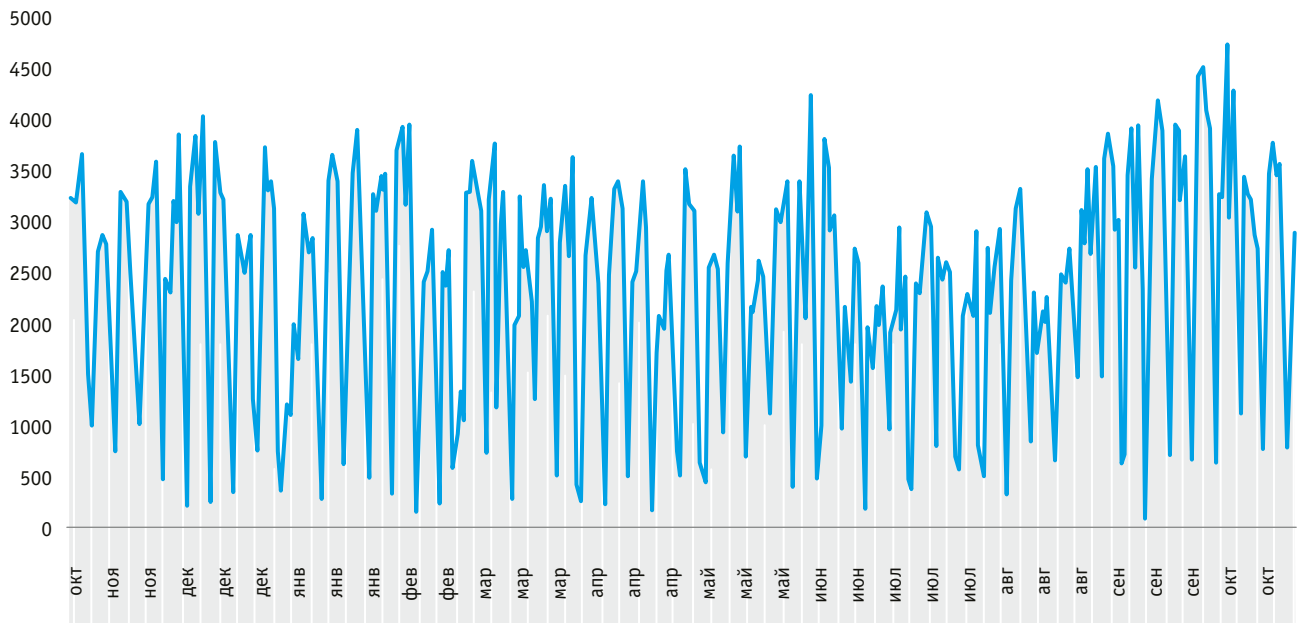


Рис. 4. Диаграмма количества перевезенных пассажиров по муниципальному маршруту № 300

Среднеквадратичное отклонение значений количества перевезенных пассажиров, в том числе рассмотренное отдельно по будним и выходным дням, позволяет сделать вывод о наличии постоянных пассажиров, сменяемости и степени задублированности с другими маршрутами.

Например, число транзакций по маршруту № 300, взятое только по будним дням, варьируется в среднем от 1500 до 4500 шт., коэффициент вариации по выборке за 12 месяцев составляет 47 %, что указывает на высокую сменяемость

пассажиры и наличие альтернативных маршрутов, позволяющих пассажирам добираться по места назначения, не дожидаясь автобуса, следующего по маршруту № 300 (рис. 4 и 5).

Резкое падение пассажиропотока транспортно-логистической системы в будние дни на отдельных маршрутах свидетельствует либо о наступлении внешних обстоятельств, препятствующих перевозке (задержки движения, вызванные дорожными работами, ДТП, обильным снегопадом, подтоплением дороги и т.п.), либо о внутренних проблемах у перевозчика

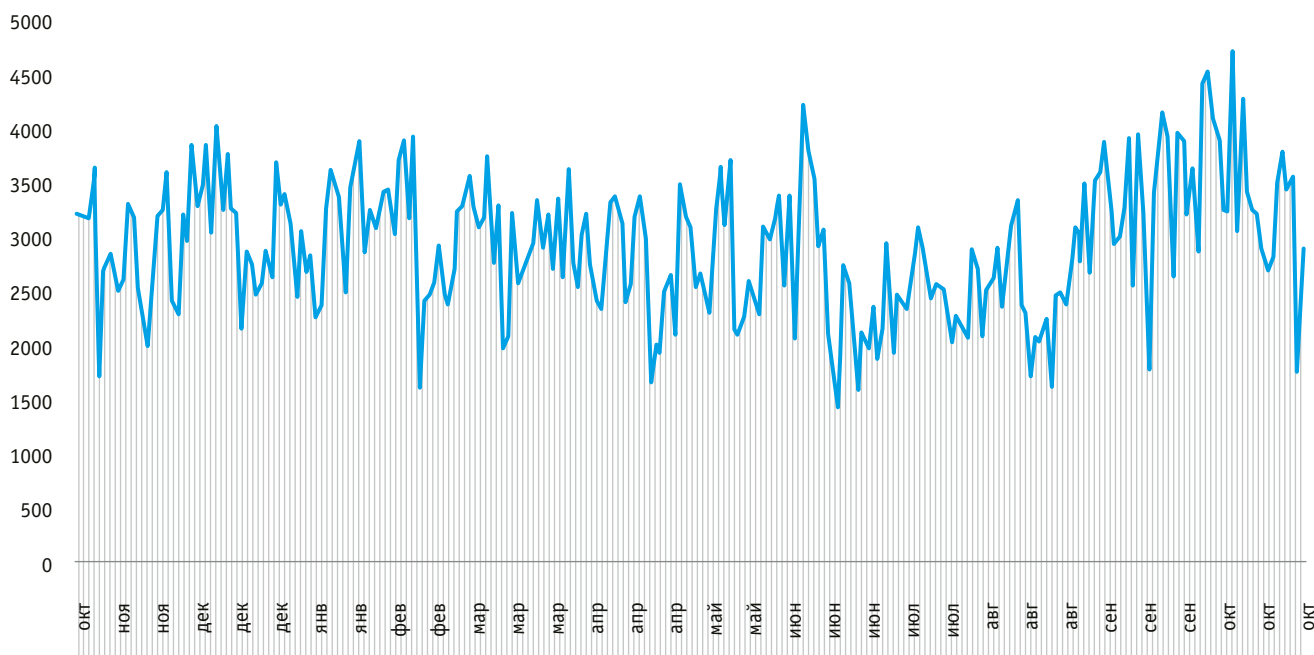


Рис. 5. Диаграмма количества перевезенных пассажиров по муниципальному маршруту № 300 по будним дням

(дефицит водителей, поломка автобусов, отсутствие запасных частей и т. д.). Раннее выявление проблемы позволяет проработать возможные алгоритмы ее решения, такие как корректировка выпуска подвижного состава, расписаний движения, поиск нового перевозчика, установление нового маршрута, изменение схемы существующего маршрута и т. п.

Одним из таких проблемных вопросов в Липецке является транспортное обслуживание района Манеж. Улица 50 лет НЛМК, по которой осуществляется движение автобусов через этот район, географически дублируется с проспектом Победы, обладающим гораздо большим количеством объектов притяжения и числом людей, проживающих в зоне пешеходной доступности остановок транспорта общего пользования. Данное обстоятельство в условиях зависимости устойчивого финансового благосостояния перевозчиков от количества собираемой с линии выручки делает обслуживание района Манеж менее привлекательным по сравнению с маршрутами, проходящими через пр. Победы. Как следствие, от обслуживания маршрута № 302 (рис. 6), проходящего через ул. 50 лет НЛМК, перевозчики отказываются. Проблему можно решить только путем увеличения финансирования транспортной работы по маршруту из бюджета города.

Другим примером наглядной зависимости числа перевезенных пассажиров от регулярности движения и обеспечения планового выпуска автобусов является муниципальный маршрут № 12 (рис. 7). Проблема с недовыпуском подвижного состава на линию вызвана возникновением острого дефицита водителей и необходимостью переключений транспорта на другие социально значимые маршруты.

Существуют также муниципальные маршруты с относительно низким регулярным спросом, но с ярко выраженным пиковым спросом в отдельные дни года, как показано на рис. 8.

Кроме того, рис. 8 демонстрирует существенную разницу количества перевозимых пассажиров в левой и в правой части графика. Это связано с тем, что у организации-перевозчика сменились учредители, в результате чего показатели выполнения транспортной работы существенно изменились в лучшую сторону.

Для дальнейшего анализа потребовалось преобразовать ряд данных по фактической выручке на маршрутах и сравнить их с расчетным показателем платы за проезд, которая в соответствии с приказом Минтранса России № 351 должна поступить в распоряжение перевозчика (рис. 9).

В большинстве случаев при исполнении муниципально-го контракта на пассажирские перевозки по модели нетто-контрактов оплата производится по цене 1 км пробега, которая определяется как отношение цены контракта к плановому пробегу по маршруту в установленный период. Таким образом, верхняя часть диаграммы на рис. 9 показывает количество выручки в день, которое перевозчики собирают с линии сверх того, что установлено расчетным значением при определении цены 1 км пробега, а нижняя часть диаграммы показывает количество выручки в день, которое перевозчики недобирают с линии относительно плана, установленного расчетным значением при определении цены 1 км пробега.

Кроме того, рис. 9 также служит свидетельством взаимосвязанности пассажиропотоков городской маршрутной сети, где при посадке в обслуживании одного маршрута фиксируется рост перевозок на смежном или частично дублирующем маршруте, что, в свою очередь, также иллюстрирует всеобщий естественный закон М. В. Ломоносова [8]. Согласно первому описанию закона, данному Ломоносовым в письме математику Эйлеру в XVIII в., к какому-либо телу прибавляется столько материи, сколько теряется у другого, времени на одно дело

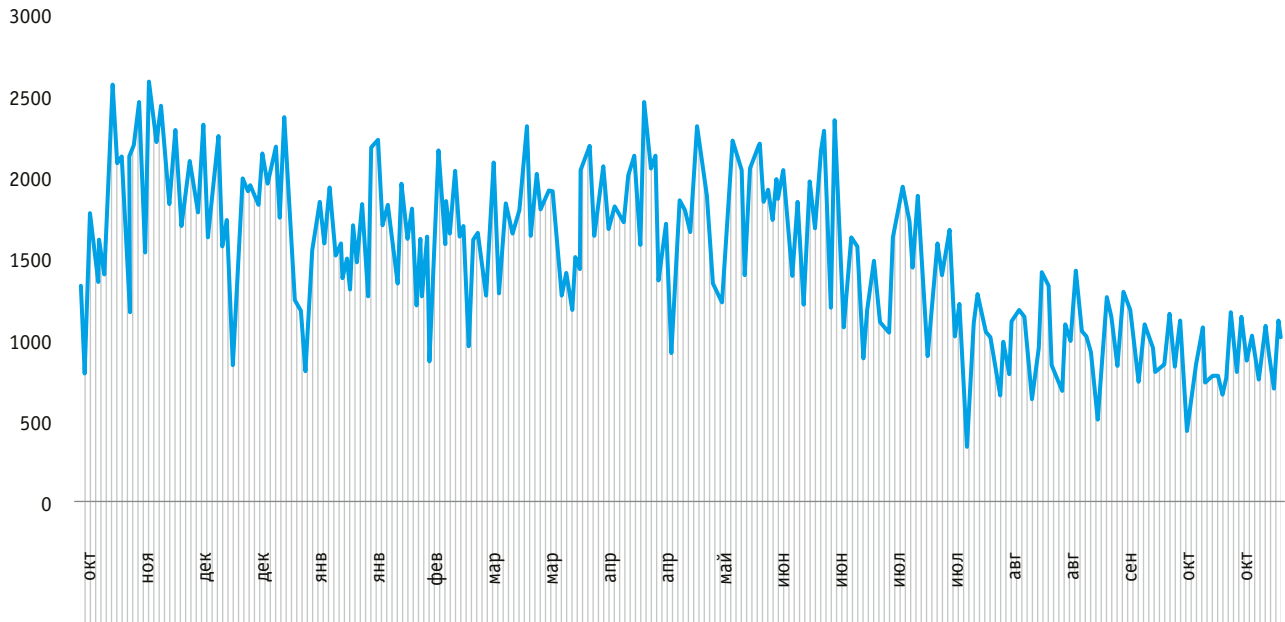


Рис. 6. Диаграмма количества перевезенных пассажиров по муниципальному маршруту № 302 в будние дни

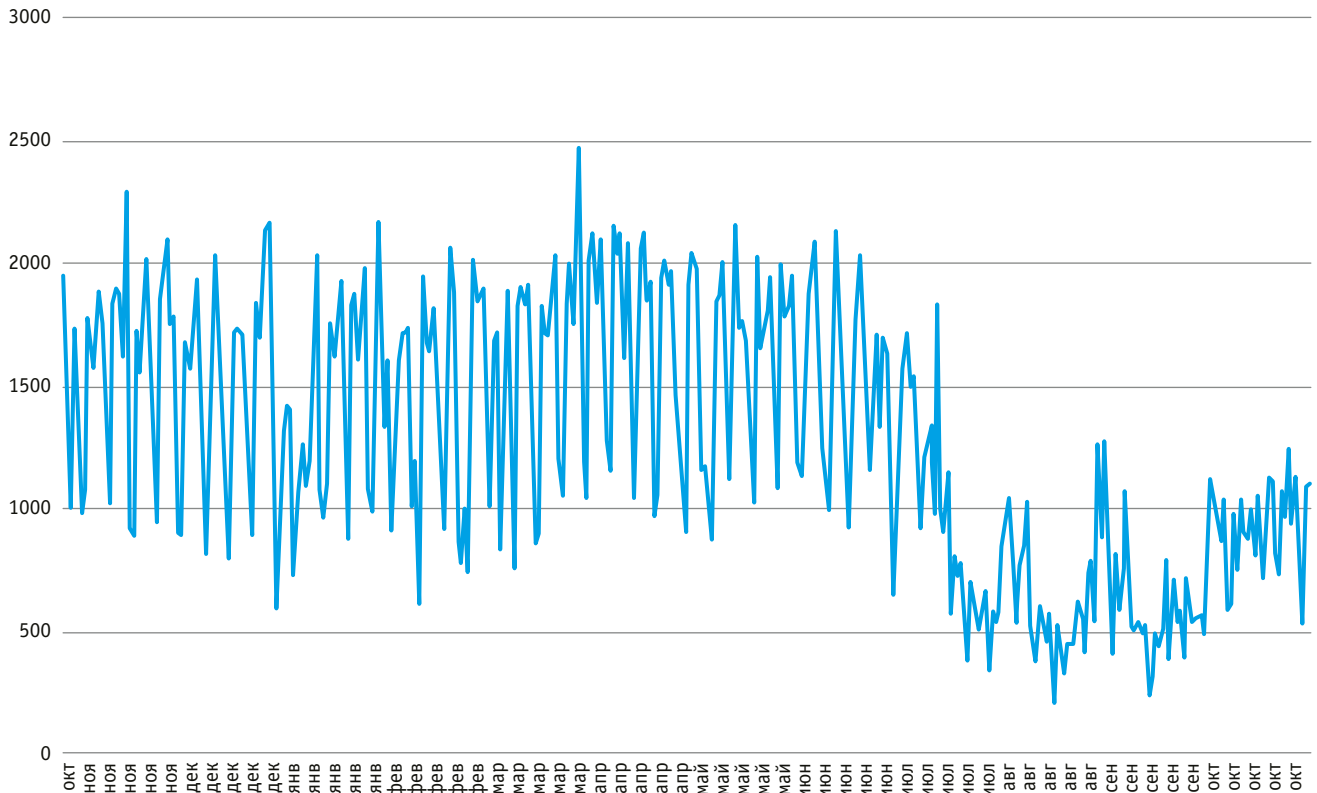


Рис. 7. График количества перевезенных пассажиров по маршруту № 12, на котором перевозчик с июля 2023 г. не смог обеспечить плановый выпуск автобусов

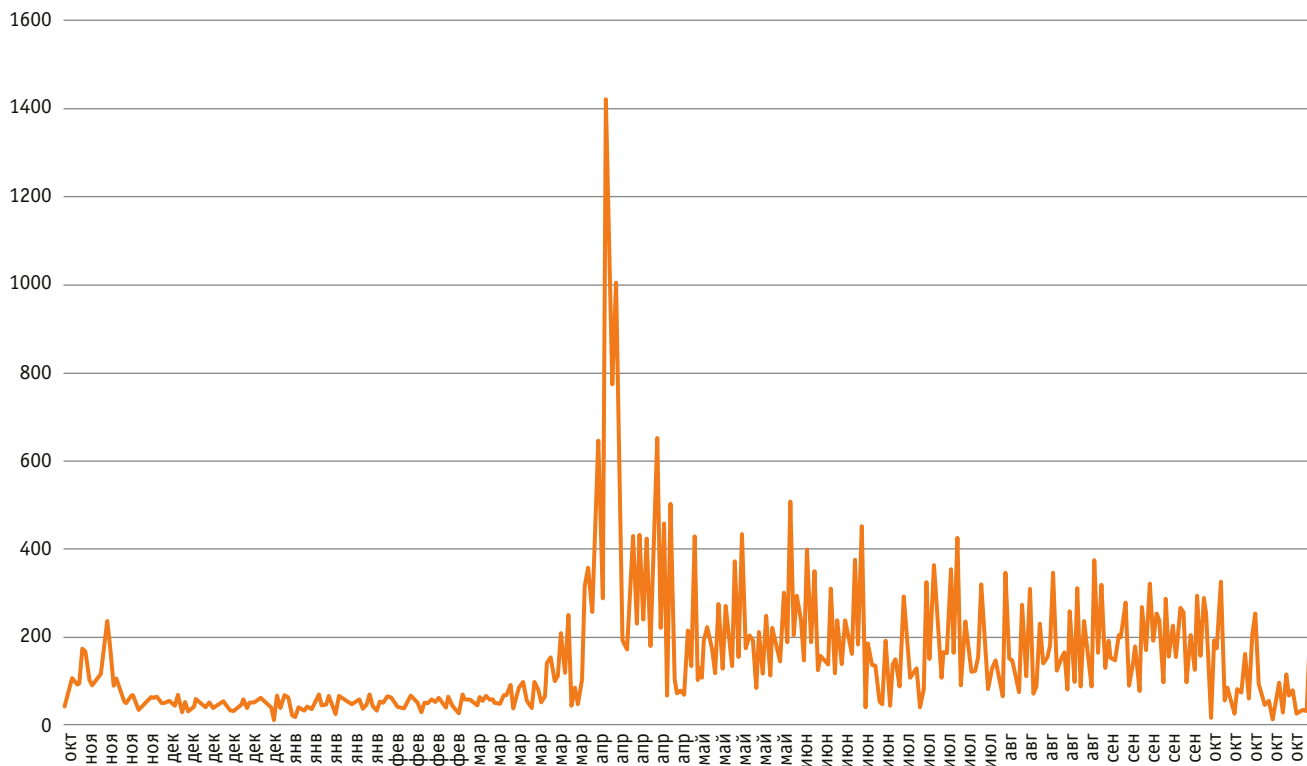


Рис. 8. Диаграмма количества перевезенных пассажиров по муниципальному маршруту № 13, на котором есть пиковый спрос в православные праздники

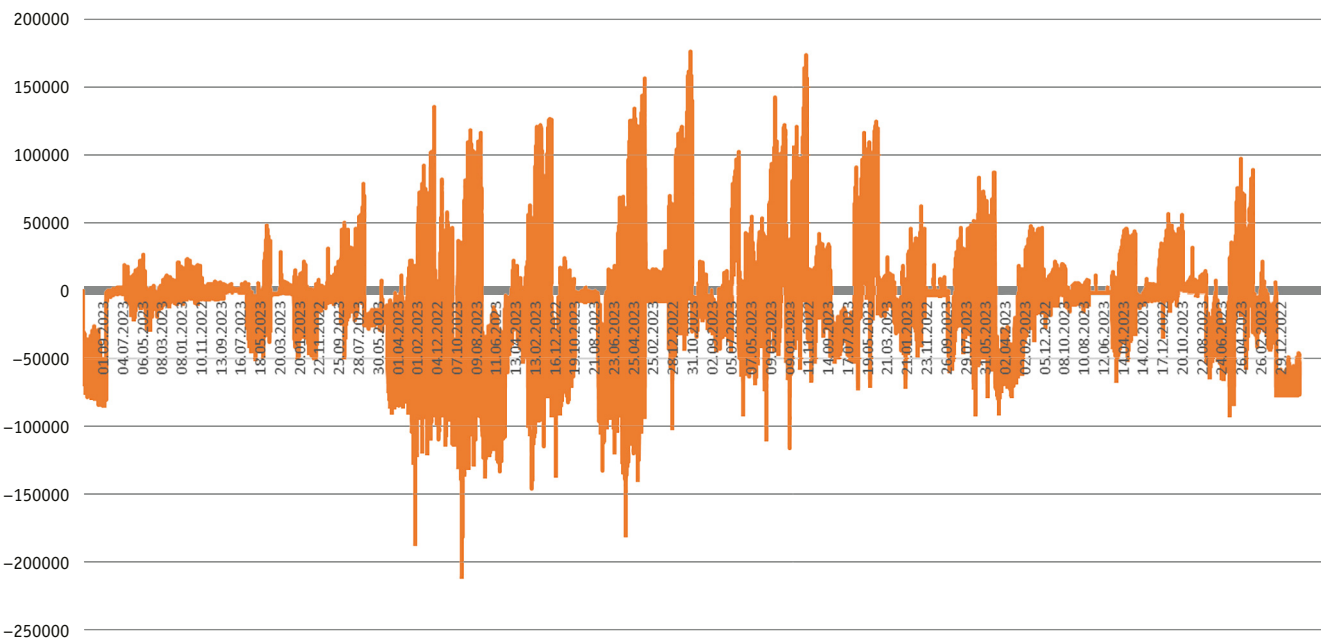


Рис. 9. Диаграмма отклонений между фактической суточной выручкой на маршрутах (руб.) и расчетными значениями, определенными по методике, утвержденной приказом Минтранса России № 351

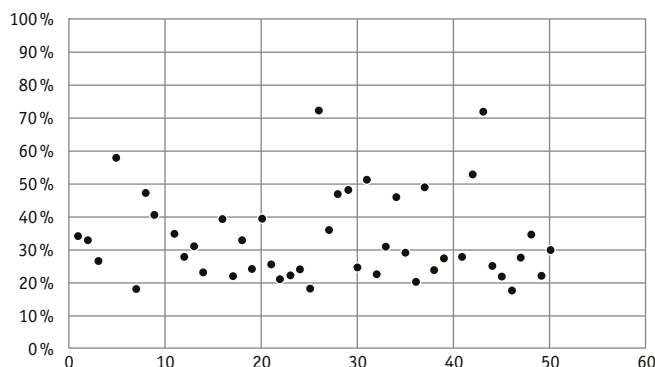


Рис. 10. Распределение коэффициентов вариации по будним дням

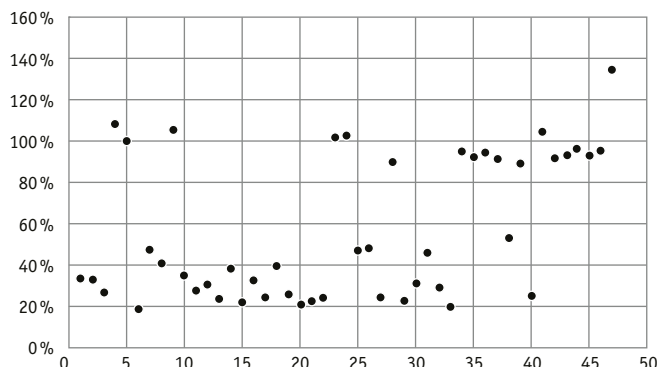


Рис. 11. Распределение коэффициентов вариации по выходным дням

прибавляется ровно столько, сколько его отнимается у другого дела. Этот всеобщий закон природы распространяется и на другие более сложные системы. Рассматривая транспортно-логистическую систему крупного города, в котором неотъемлемой составляющей экономического развития является эффективность ежедневного перемещения людей, всеобщий естественный закон проявляется в перераспределении пассажиров между муниципальными маршрутами, а также в перераспределении по видам транспорта и способу передвижения (пешком, на велосипеде, на электросамокате, на личном автомобиле, на такси, на транспорте общего пользования и т.д.). Чтобы обеспечить устойчивое экономическое развитие города, система общественного транспорта, как наиболее эффективный способ массового передвижения людей в стесненных условиях городского пространства, должна работать качественно и предсказуемо [9].

На основе полученных результатов анализа данных системы безналичной оплаты проезда можно предложить пути повышения эффективности работы пассажирской транспортно-логистической муниципальной системы. С учетом объективной невозможности прогнозировать все внешние факторы, которые влияют на обслуживание муниципальных маршрутов, риски переплаты или недофинансирования транспортных услуг можно минимизировать двумя способами.

1. Вся выручка с линии должна поступать в распоряжение заказчика, который в свою очередь обязан оплатить перевозчиком все расходы на перевозку с фиксированной рентабельностью.

Сведения об авторах:

Мария Юрьевна Карелина, доктор технических наук, доктор педагогических наук, доктор технических наук, проректор Государственного университета управления

Владимир Юрьевич Линник, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры экономики и управления в топливно-энергетическом комплексе Государственного университета управления

Юлия Николаевна Ризаева, член Общественного совета при Министерстве транспорта Российской Федерации, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и стандартизации «МИРЭА — Российского технологического университета»

Александр Сергеевич Лукинов, заместитель председателя департамента транспорта администрации города Липецка

2. Вся маршрутная сеть должна обслуживаться одним перевозчиком, генерирующим общий доход и общие расходы рынка перевозок.

Для дальнейшего анализа данных были определены коэффициенты вариации фактической выручки по муниципальным маршрутам Липецка в будние и выходные дни за 12 месяцев (рис. 10 и 11).

При анализе данных по 51 муниципальному маршруту установлено, что только 28 маршрутов (или 55 % от общего числа) имеют однородный показатель выручки с линии в будний день с коэффициентом вариации не более 33 %.

Анализ данных по 47 муниципальным маршрутам, работающим в выходные дни, показал, что только 18 маршрутов (или 38 % от общего числа) имеют однородный показатель выручки с линии в выходной день с коэффициентом вариации не более 33 %.

Таким образом, при расчете НМЦК прогнозирование показателя платы за проезд, поступающей в распоряжение перевозчика в период действия контракта, в условиях неоднородности фактических значений характеризуется низкой степенью надежности.

Для повышения эффективности работы городской пассажирской транспортно-логистической системы требуются минимизация рисков возникновения погрешности при определении НМЦК, обсуждение допустимых форм типовых контрактов на перевозки либо коренной пересмотр формата правовых отношений между пассажиром, перевозчиком и заказчиком.

Authors information:

Maria Yu. Karelina, DSc in Pedagogics, DSc in Engineering, Vice-Rector of State University of Management

Vladimir Yu. Linnik, DSc in Economics, Associate Professor, Professor of Economics and Management in the Fuel and Energy Complex Department, State University of Management

Yulia N. Rizaeva, Member of the Public Council of the Ministry of Transport of the Russian Federation, DSc in Engineering, Professor of Metrology and Standardization Department, MIREA — Russian Technological University

Alexander S. Lukinov, Vice-Chair of Lipetsk Department of Transportation, Administration of the city of Lipetsk

Литература

1. Vuchic Vukan R. *Urban Transit Systems and Technology*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2007. 624 p.
2. Арефьев О. В. Двухсторонние договоры перевозки в трехмерной реальности брутто-контрактов // *Городской транспорт*. 2023. № 9. С. 16–20. ISSN 2782-5752.
3. Об организации регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон от 13.07.2015 г. № 220-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_182659/ (дата обращения: 01.03.2024).
4. О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд : Федеральный закон от 05.04.2013 г. № 44-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144624/ (дата обращения: 01.03.2024).
5. О сфере деятельности, в которой при осуществлении закупок устанавливается порядок определения начальной (максимальной) цены контракта, цены контракта, заключаемого с единственным поставщиком (подрядчиком, исполнителем), и федеральном органе исполнительной власти, устанавливающим такой порядок : Постановление Правительства Российской Федерации от 11.10.2016 г. № 1028. URL: <http://government.ru/docs/all/108588/> (дата обращения: 01.03.2024).
6. Об утверждении Порядка определения начальной (максимальной) цены контракта, а также цены контракта, заключаемого с единственным поставщиком (подрядчиком, исполнителем), при осуществлении закупок в сфере регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом : приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 20.10.2021 г. № 351. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_404090/0afbb12d11dfc6f03f7879135fc1ac68382593b1/ (дата обращения: 01.03.2024).
7. Об утверждении типовых контрактов на выполнение работ, связанных с осуществлением регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом по регулируемым тарифам, и информационных карт типовых контрактов на выполнение работ, связанных с осуществлением регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом по регулируемым тарифам : приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 29.12.2018 г. № 482. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_329865/ (дата обращения: 01.03.2024).
8. Ломоносов Михаил Васильевич // *Большая советская энциклопедия* / Гл. ред. А. М. Прохоров. 3-е изд. Москва : Сов. энциклопедия, 1974. Т. 15. С. 8–11.
9. 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.

References

1. Vuchic Vukan R. *Urban Transit Systems and Technology*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2007. 624 p.
2. Aref'ev O. V. Bilateral transportation contracts in the three-dimensional reality of gross contracts. *Urban Transport*. 2023. No. 9. Pp. 16–20. ISSN 2782-5752. (In Russian).
3. On the organization of regular transportation of passengers and luggage by road and urban ground electric transport in the Russian Federation and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation : The Federal Law dated 13.07.2015 No. 220-FZ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_182659/ (access date: 01.03.2024). (In Russian).
4. On the contract system in the field of procurement of goods, works, services to meet state and municipal needs : the Federal Law dated 05.04.2013 No. 44-FZ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144624/ (access date: 01.03.2024). (In Russian).
5. On the field of activity in which, when making procurements, the procedure for determining the initial (maximum) price of a contract, the price of a contract concluded with a single supplier (contractor, performer) is established, and the federal executive body establishing such a procedure : the Order of the Government of the Russian Federation dated 11.10.2016 No. 1028. URL: <http://government.ru/docs/all/108588/> (access date: 01.03.2024). (In Russian).
6. On approval of the Procedure for determining the initial (maximum) price of a contract, as well as the price of a contract concluded with a single supplier (contractor, performer), when making purchases in the field of regular transportation of passengers and luggage by road and urban ground electric transport : the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 20.10.2021 No. 351. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_404090/0afbb12d11dfc6f03f7879135fc1ac68382593b1/ (access date: 01.03.2024). (In Russian).
7. On approval of standard contracts for the performance of work related to the implementation of regular transportation of passengers and luggage by road transport and urban ground electric transport at regulated tariffs, and information cards of standard contracts for the performance of work related to the implementation of regular transportation of passengers and luggage by road and urban ground electric transport at regulated tariffs : the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 29.12.2018 No. 482. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_329865/ (access date: 01.03.2024). (In Russian).
8. Lomonosov M. V. *Great Soviet Encyclopedia* : Chief editor A. M. Prokhorov, 3rd ed. Moscow : Soviet Encyclopedia, 1974. Vol. 15. Pp. 8–11. (In Russian).
9. 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).

Объем статьи 1,2 авторских листа

Научная статья

УДК 656.073.3

Международные транспортные коридоры как инструмент организации эффективной транспортно-логистической системы

Иван Алексеевич Новиков¹, Александр Сергеевич Трошин¹, Владимир Юрьевич Линник², Алексей Андреевич Акулов²¹Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия²Государственный университет управления, Москва, Россия

International transport corridors as a tool for organizing an effective transport and logistics system

Ivan A. Novikov¹, Alexander S. Troshin¹, Vladimir Yu. Linnik², Alexey A. Akulov²¹Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russia²State University of Management, Moscow, Russia

Аннотация

В современных условиях переориентации международных торговых связей многие исследователи обращают внимание на проблематику транспортной логистики товарных потоков, что подтверждается соответствующими профильными работами. В рамках настоящего исследования авторами уделено внимание особенностям организации логистической работы в разрезе различных стран мира. Отдельно, что особенно актуально, выявлена роль и место Российской Федерации в международной транспортно-логистической системе. Рассмотрены вопросы организации национальных и международных транспортных коридоров.

Ключевые слова: индекс эффективности логистики, транспортно-логистический коридор, динамика грузооборота, объем перевозок

Abstract

In modern conditions of reorientation of international trade relations, a significant number of scientists and researchers pay attention to the problems of transport logistics of commodity flows, which is confirmed by relevant specialized works. In the framework of this study, we paid attention to the peculiarities of organizing logistics work in different countries of the world. Separately, which is especially relevant, the role and place of the Russian Federation in the international transport and logistics system is revealed. The issues of organizing national and international transport corridors are considered.

Keywords: logistics efficiency index, transport and logistics corridor, dynamics of freight turnover, volume of transportation

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-85-91

В современных условиях трансформации мирового хозяйства и переориентации традиционных логистических маршрутов вопрос их рациональной организации с точки зрения предотвращения негативных последствий становится особенно актуальным. В рамках заявленного можно с уверенностью констатировать, что государства, участвующие в глобальных экономических процессах, включая Российскую Федерацию, не могут не предпринимать активных действий в этом направлении. Среди действующих механизмов можно выделить такие, как:

использование передовых технологий, в том числе современные системы управления операциями в логистике;

применение системы мультимодальных перевозок, т.е. дифференциации транспортных путей и транспорта в рамках перемещения грузов по цепочке «производитель — потребитель»; рациональная организация коммуникации в разрезе географических регионов и областей на различных иерархических уровнях, включая международный, и пр. [1].

Результатом практических мероприятий в области рационализации транспортно-логистической системы служит рост ее эффективности с экономической точки зрения. На рис. 1 показаны страны, которые, по данным Всемирного банка, используют индекс эффективности логистики (LPI) при оценке хозяйствования [2]. В рамках данного подхода оцениваются отдельные наиболее значимые аспекты логистической деятельности, в частности инфраструктура, качество международных перевозок, отслеживание перевозок, своевременность их осуществления и др.

Согласно рассматриваемому рейтингу, в 2023 г. наиболее эффективная логистика была организована в Сингапуре (табл. 1): LPI составил 4,3. Второе место у Финляндии: индекс эффективности логистики 4,2. В разрезе оцениваемых критериев заявленного индекса Финляндия незначительно отстает от Сингапура, что ставит ее в число стран-лидеров. Однако можно отметить более значительный разрыв в области инфраструктуры — на 0,4 пункта меньше, чем у Сингапура.

Россия среди 152 стран занимает 88-ю позицию с индексом эффективности логистики 2,6 (см. табл. 1). Применительно к России результаты экспертной оценки имеют следующие значения: таможенный рейтинг — 2,4; оценка инфраструктуры — 2,7; оценка международных перевозок — 2,3; оценка компетентности в области логистики — 2,6; оценка отслеживания и своевременности доставки — 2,5 и 2,9 соответственно. При этом нельзя не обратить внимание на то, что в соответствии с рейтингом Российская Федерация существенно отстает по критерию международных перевозок.

Повышение эффективности логистических связей между государствами имеет большое экономическое значение исходя из тех затрат, которые могут возникать вследствие нерациональной организации процессов взаимодействия между контрагентами. Одним из действенных инструментов в области международных транспортно-логистических систем являются международные транспортные коридоры (МТК) [3]. Помимо прочего, подобные коммуникационные каналы выступают катализаторами развития международной транспортно-логистической системы и инициируют формирование новых с географической точки зрения структур экономического, научно-технического, культурного и пр. характера.

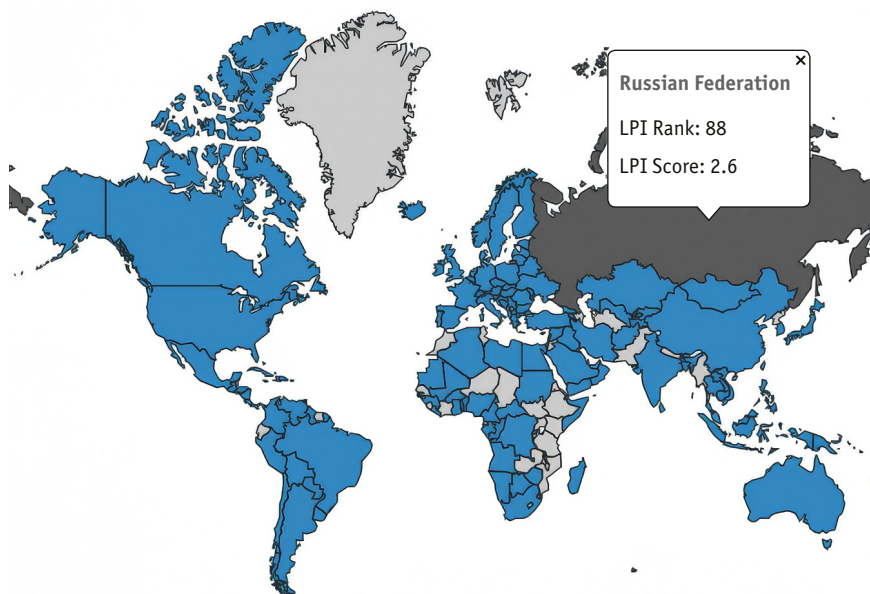


Рис. 1. География измерения индекса эффективности логистики [2]

В современных профильных исследованиях ученых и специалистов даются разнообразные трактовки термина «международный транспортный коридор», но при этом они одинаково отражают основные аспекты данного понятия. Так, эксперты ООН в области логистики трактуют МТК как «часть национальной или международной транспортной системы, которая обеспечивает значительные международные грузовые и пассажирские

перевозки между отдельными географическими районами, включает в себя подвижной состав и стационарные устройства всех видов транспорта, работающие на данном направлении, а также совокупность технологических, организационных и правовых условий осуществления этих перевозок» [4].

В нашей стране дается другое определение МТК: согласно распоряжению Правительства Российской Федерации

Таблица 1

Рейтинг стран по индексу эффективности логистики [2]

Номер в рейтинге	Страна	Оценка LPI	Таможенный рейтинг	Оценка инфраструктуры	Оценка международных перевозок	Оценка компетентности в области логистики	Оценка отслеживания	Оценка своевременности доставки
1	Сингапур	4,3	4,2	4,6	4,0	4,4	4,4	4,3
2	Финляндия	4,2	4,0	4,2	4,1	4,2	4,2	4,3
3	Германия	4,1	3,9	4,3	3,7	4,2	4,2	4,1
4	Дания	4,1	4,1	4,1	3,6	4,1	4,3	4,1
5	Нидерланды	4,1	3,9	4,2	3,7	4,2	4,2	4,0
6	Швейцария	4,1	4,1	4,4	3,6	4,3	4,2	4,2
7	Австрия	4,0	3,7	3,9	3,8	4,0	4,2	4,3
8	Бельгия	4,0	3,9	4,1	3,8	4,2	4,0	4,2
9	Канада	4,0	4,0	4,3	3,6	4,2	4,1	4,1
10	Гонконг, Китай	4,0	3,8	4,0	4,0	4,0	4,2	4,1
...
88	Российская Федерация	2,6	2,4	2,7	2,3	2,6	2,5	2,9

№ 3363-р от 27.11.2021 г., «международный транспортный коридор — это совокупность маршрутов, проходящих по территории государства и обеспечивающих перевозки пассажиров и грузов в международном сообщении на направлениях их наибольшей концентрации, а также совокупность технологических и организационно-правовых условий осуществления этих перевозок» [5].

Международные транспортные коридоры объединяют достаточно обширное число государств и, несомненно, способствуют развитию торгово-экономических отношений между странами, которые являются не только географическими соседями, но и значительно удалены друг от друга [3]. Поскольку многие логистические маршруты проходят транзитом через территорию Российской Федерации, это делает ее важным участником мировых логистических цепочек, таких как Транссибирская магистраль, Северный морской путь, Балтийский и Черноморский морские пути, Транскаспийский международный транспортный маршрут и др. (табл. 2), представля-

ющих собой наиболее значимые для мирового рынка транспортные коридоры.

Если рассматривать непосредственно транспортные коридоры, используемые странами Европейского союза, то можно выделить «Север — Юг», а также Скандинавский и Арктический коридоры (табл. 3). Нельзя не отметить тот факт, что они также территориально связаны с Российской Федерацией, географическое расположение которой можно признать уникальным.

Система транспортных коридоров России представлена и национальными, и международными транспортно-логистическими маршрутами. Наиболее значимые из них — «Север — Юг» (протяженность 7200 км), Транссиб (9288 км), Северный морской транзитный коридор (10503 км) и входящий в него Северный морской путь (5600 км). Все эти транспортные коридоры имеют евроазиатский статус и играют важную роль в обеспечении процессов коммуникации между участниками торгово-экономических отношений (табл. 4).

Таблица 2

Характеристика основных международных транспортных коридоров [6]

Международный транспортный коридор	Характеристика
Транссибирская магистраль	Железнодорожный путь, соединяющий Российскую Федерацию с Восточной Азией с одной стороны и с Европой — с другой
Северный морской путь	Наиболее короткий морской путь, соединяющий порты европейских стран с российскими портами на Дальнем Востоке, проходит вдоль берегов России с северной стороны
Балтийский и Черноморский морские пути	Связующие морские пути между Российской Федерацией и большинством стран Европейского союза, Северной и Южной Америки с одной стороны и странами СНГ — с другой
Трансазиатская железная дорога	Протяженный железнодорожный путь, основная задача которого заключается в соединении стран Азии и Востока для перевозки грузов и организации более удобной формы товарооборота
Транскаспийский международный транспортный маршрут	Один из наиболее важных международных транспортных коридоров, соединяющий Центральную Азию, Кавказ и Российскую Федерацию со странами Европы и Ближнего Востока
Трансатлантический маршрут	Маршрут, соединяющий страны Западной Африки и европейские государства через Атлантический океан

Таблица 3

Характеристика основных международных транспортных коридоров Европейского союза [6]

Международный транспортный коридор	Характеристика
«Север — Юг»	Объединяет для торговли и перевозок такие страны, как Норвегия, Швейцария, Финляндия, с одной стороны и Российская Федерация и Казахстан — с другой
«Восток — Запад»	Связывает государства Балтии с Германией, Францией и Польшей
Балтийский коридор	Транспортно-логистический путь, объединяющий все государства Балтии и часть коридора «Север — Юг» в Венгрии
Средиземноморский коридор	Соединяет государства, входящие в Европейский союз, со странами Средиземноморья
Скандинавский коридор	Связующий путь между Российской Федерацией и странами Скандинавии, проходит через территорию Финляндии
Центральный коридор	Связывает балтийские и скандинавские страны с балканскими и средиземноморскими, проходит через Центральную Европу
Восточный коридор	Связывает страны Европейского союза и государства Восточной Европы
Южный коридор	Представляет собой связующее звено между Европой, Турцией и странами Ближнего Востока
Арктический коридор	Предназначен для предоставления доступа к ресурсам Арктики

В отдельную группу принято выделять транспортные коммуникационные пути между Россией и странами Азиатско-Тихоокеанского коридора [7], включая Китайскую Народную Республику (коридоры «Приморье»). В их числе «Приморье-1» и «Приморье-2», эти коридоры исключительно водные, что отражает их особенность (см. табл. 4).

С европейскими странами Российская Федерация соединена панъевропейскими коридорами № 1, № 2, № 9, которые имеют широкую географию транспортных путей.

Необходимо отметить, что в настоящее время транспортно-логистическая система России претерпевает значительные изменения, обусловленные санкциями, принятыми в отношении нашей страны. Среди таких изменений — переориентация логистических маршрутов с европейского направления на Азиатско-Тихоокеанский регион, в котором отдельное место занимает Китайская Народная Республика. Это, в свою очередь, повышает значимость таких МТК, как «Север — Юг» и Северный морской транзитный коридор [4]. С другой стороны, поступательно развивается национальная транспортно-логистическая система, что не менее важно, учитывая значительную протяженность маршрутов доставки между различными российскими регионами.

Международный транспортный коридор «Север — Юг» по праву признается уникальным и достаточно диверсифицированным с точки зрения способов доставки грузов и действующих маршрутов. Он начал функционировать в 2000 г., когда было подписа-

но соглашение о сотрудничестве между Россией, Ираном и Индией, нацеленное на укрепление торговых отношений [8, 9]. Сегодня среди участников этого транспортного коридора уже девять государств (см. табл. 4), что свидетельствует о его развитии и экономической значимости. Географически «Север — Юг» представлен Западным, Восточным и Транскаспийским направлениями, благодаря чему обеспечивается его мультимодальность, экономическая эффективность и универсальность.

Анализ динамики грузооборота по транспортному коридору «Север — Юг» подтверждает высказанное нами ранее предположение о его развитии и возрастающей экономической значимости: в 2022 г. по этому направлению было перевезено около 14,5 млн т товаров, что на 5,1 % (0,7 млн т) больше, чем в 2021-м, а в 2023 г. прирост грузооборота составил уже 24 % к уровню 2022 г. и 30,4 % к уровню 2021-го. По оценкам экспертов, с учетом перспектив развития транспортного коридора «Север — Юг» к 2030 г. объем перевозок по нему составит не менее 32 млн т, а к 2035 г. превысит отметку в 41 млн т [10] (рис. 2).

По мнению ряда специалистов, в сложившейся ситуации достичь таких результатов вполне реально, так как большая доля экспорта МТК «Север — Юг» приходится на зерно и энергоресурсы, поставляемые в страны Ближнего Востока и СНГ, а, согласно прогнозам экспертов, до 2040 г. в России экспорт именно этих категорий товаров должен значительно вырасти.

Таблица 4

Основные транспортно-логистические коридоры России [4]

Коридор	Начальная и конечная точки маршрута	Участвующие страны	Длина, км	Виды транспортных путей
Евроазиатские коридоры				
Транссиб	От Москвы до Владивостока	Российская Федерация	9288	Железнодорожное сообщение
«Север — Юг»	От Санкт-Петербурга до Мумбаи	Российская Федерация, Иран, Индия, Азербайджан, Армения, Казахстан, Оман, Сирия, Узбекистан	7200	Железнодорожное сообщение Автомобильная дорога Водный путь
Северный морской транзитный коридор	От Мурманска до Владивостока	Российская Федерация	10503	Сообщение через водный путь
Северный морской путь	От Карских Ворот до бухты Провидения	Российская Федерация	5600	Сообщение через водный путь
Коридоры «Приморье»				
«Приморье-1»	От Харбина до портов Азиатско-Тихоокеанского региона	Российская Федерация, Китай	500	Водный путь
«Приморье-2»	От Хунчуня до портов Азиатско-Тихоокеанского региона	Российская Федерация, Китай	360	Водный путь
Панъевропейские коридоры				
№ 1	От Хельсинки до Варшавы	Российская Федерация, Финляндия, Эстония, Латвия, Литва, Польша	550 (ж/д) 445 (а/м)	Железнодорожное сообщение Автомобильное сообщение
№ 2	От Берлина до Нижнего Новгорода	Российская Федерация, Германия, Польша, Беларусь	2313 (ж/д) 2200 (а/м)	Железнодорожное сообщение Автомобильное сообщение
№ 9	От Хельсинки до Александруполиса	Российская Федерация, Финляндия, Беларусь, Молдова, Румыния, Болгария, Греция, Литва	6500	Железнодорожное сообщение Автомобильное сообщение Водный путь Авиационное сообщение

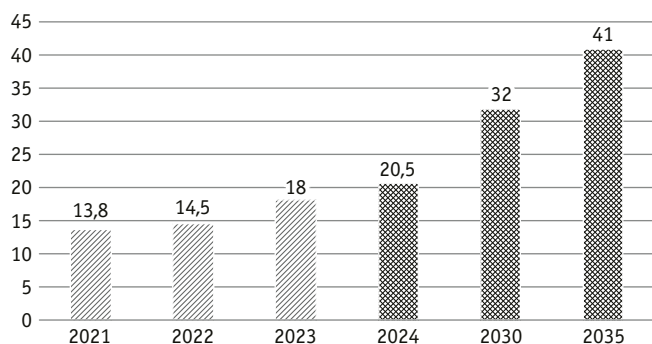


Рис. 2. Динамика грузооборота по МТК «Север — Юг», млн т

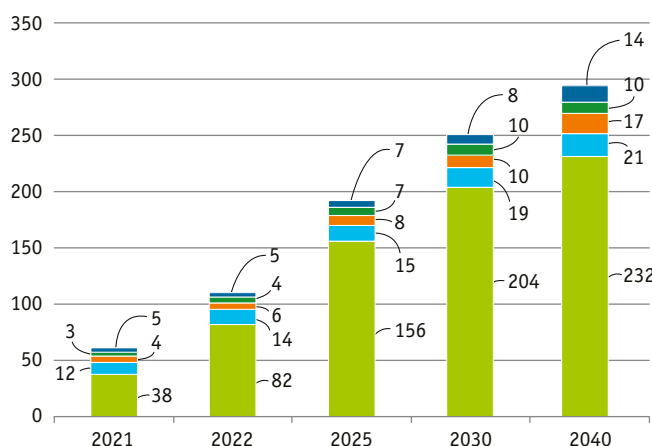


Рис. 3. Прогноз экспорта Российской Федерации на целевые рынки по видам продукции, млн т:
 ■ — прочее; ■ — черные металлы;
 ■ — удобрения; ■ — зерно; ■ — энергоресурсы

Вариант прогноза экспорта из Российской Федерации в разрезе целевых рынков по видам продукции (черные металлы, удобрения, зерно, энергоресурсы и пр.) представлен на рис. 3. Этот прогноз достаточно оптимистичен, однако следует постоянно проводить мониторинг рыночной конъюнктуры, чтобы предотвращать негативные изменения, в первую очередь факторов внешней среды.

Нельзя не отметить, что экономически эффективное функционирование транспортного коридора «Север — Юг» невозможно без надлежащего уровня независимости в принятии управленческих решений по его развитию. Среди первостепенных задач, оказывающих влияние на логистические процессы, эксперты выделяют потребность в выходе на новые рынки сбыта отечественных товаров, необходимость замещения рыночных ниш крупных мировых компаний, поиск путей экономически обоснованных транспортных затрат на поставки товаров через другие транспортные коридоры, учет перегруженности действующих транспортных коридоров и пр. [11].

В настоящее время на разных стадиях реализации находятся 102 проекта по модернизации и расширению транспортного коридора «Север — Юг» общей стоимостью около 13,2 млрд долл. При этом 69 % финансовых ресурсов планируется направить на развитие западного направления, а 59 проектов из 102 заявленных — на развитие автомобильных дорог [8].

Еще один важнейший для России МТК — Северный морской транзитный коридор. Он был создан для организации транспортно-логистической системы перевозок грузов между странами Европы и Азии и использует маршруты Северного морского пути [12], который проходит через все моря бассейна Северного Ледовитого океана, омывающие берега России (рис. 4).

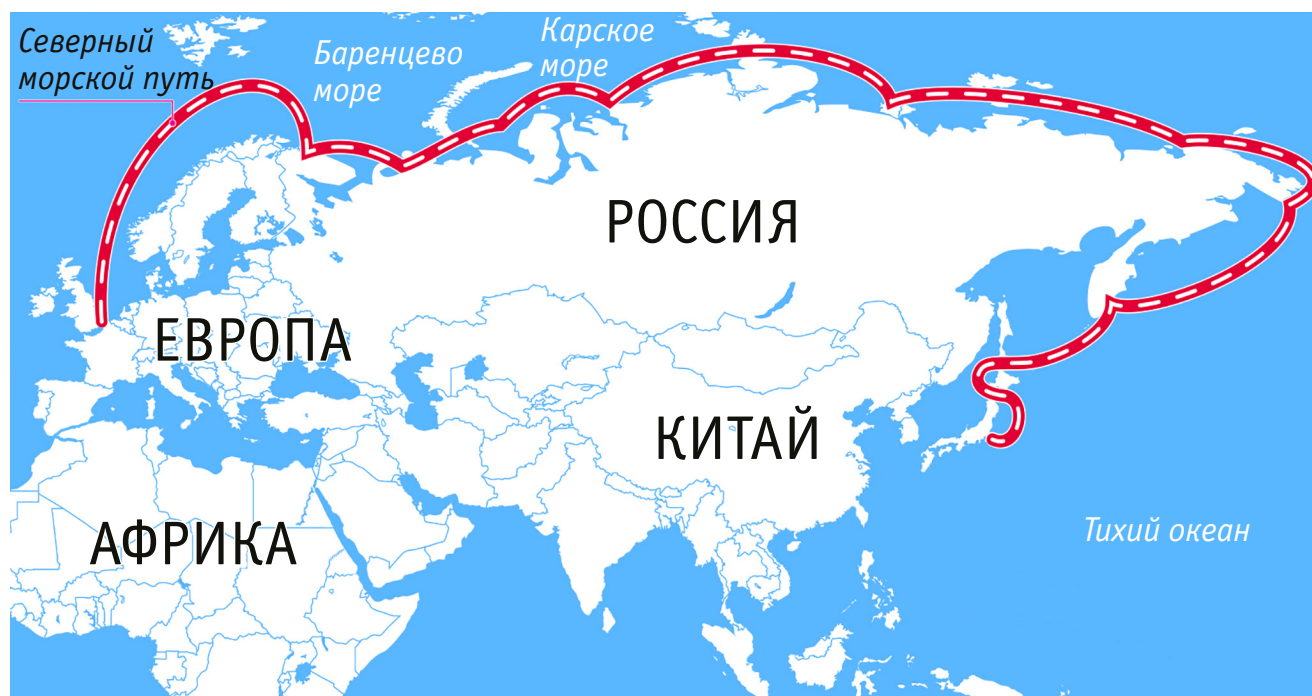


Рис. 4. Схема Северного морского транзитного коридора [13]

Значимость Северного морского транзитного коридора, инициированного в 2019 г. государственной корпорацией «Росатом», соответствует в том числе национальным целям и стратегии развития России до 2030 г. [9].

В результате реализации проекта «Северный морской транзитный коридор» грузооборот по Северному морскому пути вырос на 55,9 % в год, составив в 2019 г. 31,5 млн т. За два последующих года из-за санкций и ограничений, которые были введены в отношении Российской Федерации, темпы роста существенно уменьшились, но в абсолютном значении рост продолжался до 2022 г. В 2023 г. грузооборот возобновил рост, превысив показатели предыдущих периодов и составил уже 36 млн т (рис. 5).

Несмотря на незначительный временной период своего функционирования, Северный морской транзитный коридор по многим критериям превосходит в конкурентной борьбе другие водные транспортные пути благодаря хорошо развитой инфраструктуре, постоянно строящимся и развивающимся морским портам, высокоуровневой навигации и т.д. При этом в ближайшей перспективе планируется увеличить грузооборот и самого Северного морского пути за счет освоения месторождений Арктики и укрепления логистических связей [14].

Сведения об авторах:

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

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

Владимир Юрьевич Линник, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры экономики и управления в топливно-энергетическом комплексе Государственного университета управления

Алексей Андреевич Акулов, кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательского института государственной политики и управления отраслевой экономикой Государственного университета управления

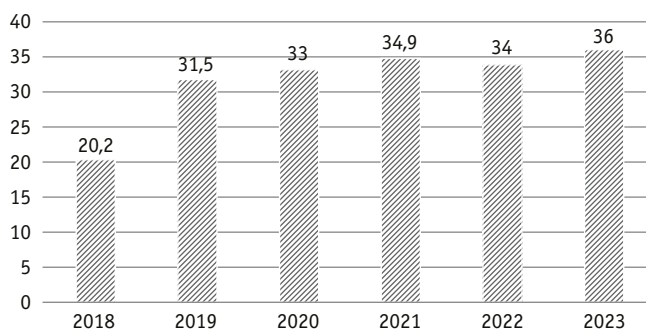


Рис. 5. Объем перевозок по Северному морскому пути, млн т

В заключение отметим, что современные транспортно-логистические системы играют значительную роль в обеспечении конкурентоспособности Российской Федерации на мировой арене. Это подтверждается развитием торгово-экономических отношений между национальными хозяйствующими субъектами и всеми заинтересованными сторонами. В свою очередь, экономически целесообразные и независимые с точки зрения внешнего воздействия логистические маршруты оказывают непосредственное влияние на безопасность Российской Федерации и ее стратегическое развитие.

Authors information:

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

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

Vladimir Yu. Linnik, DSc in Economics, Associate Professor, Professor of Economics and Management in the Fuel and Energy Complex Department, State University of Management

Alexey A. Akulov, PhD in Engineering, Researcher of Research Institute of State Policy and Sectoral Economy Management, State University of Management

Литература

1. Логистика транспорта — эффективная организация перевозок, оптимизация расходов и повышение производительности. URL: <https://logists-by.turbopages.org/logists.by/s/blog/logistika-transport-effektivnaya-organizatsiya-perevozok-optimizatsiya-rashodov-i-povyshenie-proizvoditelnosti> (дата обращения: 12.03.2024).
2. Toggle navigation Logistics Performance Index (LPI). URL: <https://lpi.worldbank.org/international/global> (дата обращения: 05.03.2024).
3. Конкурентоспособность транспортных коридоров России в системе международных транспортных коридоров / О. А. Рочева, Р. С. Зарипова, И. Г. Морозова, Ф. Р. Хамидуллина // *International Journal of Advanced Studies*. 2021. Т. 11. № 1. С. 7–16. DOI: <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2021-11-1-7-16>.

References

1. Logistics of transport — an effective organization transportation, cost optimization and productivity improvement. URL: <https://logists-by.turbopages.org/logists.by/s/blog/logistika-transport-effektivnaya-organizatsiya-perevozok-optimizatsiya-rashodov-i-povyshenie-proizvoditelnosti> (access date: 12.03.2024). (In Russian).
2. Toggle navigation Logistics Performance Index (LPI). URL: <https://lpi.worldbank.org/international/global> (access date: 05.03.2024).
3. Rocheva O. A., Zaripova R. S., Morozova I. G., Khamidullina F. R. Competitiveness of Russian transport corridors in the system of international transport corridors. *International Journal of Advanced Studies*. 2021. Vol. 11. No. 1. Pp. 7–16. DOI: <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2021-11-1-7-16>. (In Russian).

4. Путь на Восток: развитие евразийских транспортных коридоров. URL: <https://rusiranexpo.ru/wp-content/uploads/2023/11/202311-ltmmwtkmo573845666> (дата обращения: 12.03.2024).
5. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577?ysclid=lwabetdxq495176741> (дата обращения: 12.03.2024).
6. Международные транспортные коридоры. URL: <https://datrans.ru/articles/mezhdunarodnye-transportnye-koridory/?ysclid=ltebcbp69u967228759> (дата обращения: 07.03.2024).
7. Куликов А. А., Куликов А. В., Шевцова А. Г. Анализ современного развития транспортных логистических систем России и Южной Кореи // *Наукоемкие технологии и инновации : сборник докладов Международной научно-практической конференции*. Белгород, 2023. С. 1001–1003.
8. Проактивная стратегия развития МТК «Север — Юг» для обеспечения логистики. URL: <file:///C:/Users/Belgorod/Downloads/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B5%D0%BD%D20.pdf> (дата обращения: 16.03.2024).
9. Николаева А. Б. Перспективы развития Северного морского транспортного коридора // *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2017. № 4 (55). С. 106–113. ISSN 2220-802X.
10. РЖД удвоили объем грузовых перевозок по МТК «Север — Юг» с начала 2023 года. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=213166#:~:text=%> (дата обращения: 16.03.2024).
11. Неводчикова Е. Р. Оценка потенциала международного транспортного коридора «Север — Юг» в системе транспортных коридоров России // *Актуальные вопросы современной экономической науки : материалы XII Международной научной конференции*, Астрахань, 22 апреля 2022 г. Астрахань : Астраханский государственный университет, 2022. С. 282–285.
12. Проект «Северный морской транзитный коридор». URL: https://nticenter.spbstu.ru/nti_projects/57?ysclid=ltxf0l18kz562831451 (дата обращения: 18.03.2024).
13. Ерохин В. Л. Динамика грузоперевозок по Северному морскому пути (2013–2023 гг.) // *Маркетинг и логистика*. 2023. № 6 (50). С. 14–23.
14. Трегуб М. А., Ярошенко-Соколовская К. А. Перспективы развития Северного морского пути. Северный морской транзитный коридор // *Системный анализ и логистика*. 2021. № 1 (27). С. 44–48. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-1-44-48.
4. The way to the East: the development of Eurasian transport corridors. URL: <https://rusiranexpo.ru/wp-content/uploads/2023/11/202311-ltmmwtkmo573845666> (access date: 12.03.2024). (In Russian).
5. About the Russian Federation transport strategy up to 2030 with a forecast for the period up to 2035 : the Order of the Government of the Russian Federation dated 27.11.2021 No. 3363-r. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577?ysclid=lwabetdxq495176741> (access date: 12.03.2024). (In Russian).
6. International transport corridors. URL: <https://datrans.ru/articles/mezhdunarodnye-transportnye-koridory/?ysclid=ltebcbp69u967228759> (access date: 07.03.2024). (In Russian).
7. Kulikov A. A., Kulikov A. V., Shevtsova A. G. Analysis of the modern development of transport logistics systems in Russia and South Korea. *Science-intensive technologies and innovations : collection of reports of the International scientific and practical conference*. Belgorod, 2023. Pp. 1001–1003. (In Russian).
8. Proactive development strategy of the North-South International Transport Corridor to ensure logistics. URL: <file:///C:/Users/Belgorod/Downloads/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B5%D0%BD%D20.pdf> (access date: 16.03.2024). (In Russian).
9. Nikolayeva A. B. Perspectives of development of the Northern Sea Transport Corridor. *The North and the market: the formation of an economic order*. 2017. No. 4 (55). Pp. 106–113. ISSN 2220-802X. (In Russian).
10. Russian Railways has doubled the volume of freight traffic on the North-South International Transport Corridor since the beginning of 2023. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=213166#:~:text=%> (access date: 16.03.2024). (In Russian).
11. Nevodchikova E. R. Assessment of the potential of the North-South International Transport Corridor in the Russian transport corridor system. *Topical issues of modern economics : proceedings of the 12th International scientific conference*, Astrakhan, April 22, 2022. Astrakhan : Astrakhan State University, 2022. Pp. 282–285. (In Russian).
12. Northern Sea Transit Corridor project. URL: https://nticenter.spbstu.ru/nti_projects/57?ysclid=ltxf0l18kz562831451 (access date: 18.03.2024). (In Russian).
13. Erokhin V. L. Dynamics of cargo transportation along the Northern Sea Route (2013–2023). *Marketing and Logistics*. 2023. No. 6 (50). Pp. 14–23. (In Russian).
14. Tregub M. A., Iaroshenko-Sokolovskaia K. A. Prospects for the development of the Northern Sea Route. Northern Sea Transit Corridor. *System Analysis and Logistics*. 2021. No. 1 (27). Pp. 44–48. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-1-44-48. (In Russian).

Объем статьи 0,79 авторских листа

Научная статья

УДК 621.332

Устройство токосъема с контактного провода трехфазной системы электрической тяги

 Борис Алексеевич Аржанников¹, Игорь Станиславович Цихалевский¹
¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

Current-collection device from the contact wire of three-phase electric traction system

 Boris A. Arzhannikov¹, Igor S. Tsikhalevskiy¹
¹Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

В статье рассмотрена возможность использования трехфазной системы электрической тяги, которая эксплуатировалась с конца XIX в. до 1976 г. Выполнено сравнение предлагаемой системы с однофазной системой электрической тяги переменного тока.

В ходе проведенных исследований определены соотношения токов и потерь мощности в тяговых сетях однофазной и трехфазной систем. Как показали расчеты, потери электроэнергии в контактной сети однофазной системы электрической тяги в 3,35 раза больше, чем в трехфазной системе.

Изучено влияние тока на электроэрозию, на износ контактного провода и токосъемной вставки полоза токоприемника электроподвижного состава, а также влияние интенсивности токосъема и зигзага подвески контактного провода на габарит токоприемника. Приведены результаты экспериментальных и расчетных значений коэффициента износа контактного провода в зависимости от тока токосъема.

Предложены три варианта размера полоза для малогабаритного токоприемника электровоза переменного тока трехфазной системы электрической тяги.

Ключевые слова: постоянный и переменный ток, электрическая тяга, контактная сеть, токосъем, токоприемник, электровоз, электроэрозия

Abstract

The article deals with the opportunity of using three-phase electric traction system which was operated from the end of XIX century to 1976. A comparison of the suggested system to one-phase electric traction system of alternating current has been conducted.

During the research the ratio of the currents and the power losses in the traction networks of one-phase and three-phase systems has been determined. The calculations show that the losses of the electric power in the contact network of one-phase electric traction system is 3.35 times more than in the three-phase system.

The influence of current on electro erosion, wear and tear of a contact wire and electric power collector of the runner of an electric rolling stock current-collector, and also, the influence of the intensiveness of the current-collection and the suspension zigzag of the contact wire on the gauge of the current-collector has been researched. The results of the experimental and calculated values of the coefficient of the wear and tear of the contact wire depending on the current of the current-collector have been presented.

Three variants of the size of the runner for a small-sized current-collector of an electric locomotive of AC three-phase electric traction system have been suggested.

Keywords: direct and alternating current, electric traction, contact network, current collecting, current-collector, electric locomotive, electro erosion

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-92-99

ВВЕДЕНИЕ

При разработке трехфазной системы электрической тяги (ТСЭТ) взаимодействие контактного провода и токоприемника электровоза может быть обеспечено боковым токосъемом или токосъемом «по низу».

Токосъем «по низу» применяется в системе электрической тяги постоянного тока (З кВ) и однофазного переменного тока 25 кВ 50 Гц (ОСЭТ). Впервые однофазное питание с токосъемом «по низу» было реализовано фирмой «Эрликон» в 1901 г., а затем в 1904 г. на линии Seebach — Wettingen Швейцарских железных дорог при однофазном напряжении в контактной сети 15 кВ 50 Гц [1]. В результате расчета качества токосъема с использованием указанных вариантов за основу разработки трехфазной СЭТ принят токосъем «по низу» [2].

Особый элемент в системе электрической тяги, обеспечивающий ее надежную и бесперебойную работу, — это токоприемник электровоза, служащий для электрического соединения между контактным проводом и электрическими цепями электроподвижного состава (ЭПС).

Для локомотивов систем электрической тяги разработаны токоприемники следующих видов: пантограф, полупантограф, дуговой (бугельный) и рельсовый, которые, кроме присущих каждому токоприемнику характеристик, должны отвечать общим требованиям аэродинамики, зависящим от формы профилей, формы лобовой части крыши электровоза, определяющей направление струй воздуха и влияющей на парусность и боковую устойчивость (жесткость) токоприемника.

На рис. 1 представлены наиболее распространенные по назначению области применения токоприемники полупантографного вида, установленные на крыше грузовых однофазных электровозов переменного тока [1].



Рис. 1. Локомотивы с установленными на крыше токоприемниками полупантографного вида:

а — Deutsche Bahn, локомотив переменного тока DBAG; *б* — New Jersey Transit, локомотив переменного тока на базе DBAG

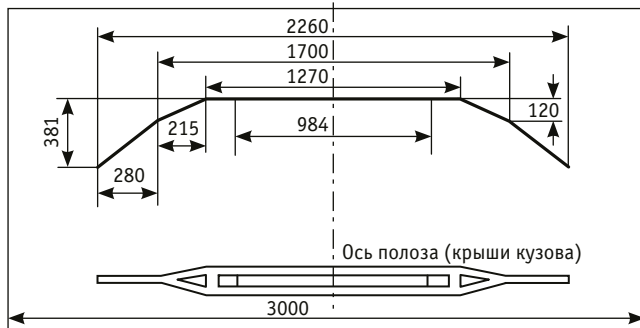


Рис. 2. Вид и размеры полоза токоприемника однофазного электровоза переменного тока с токосъемом «по низу»

Токоприемник от воздушной контактной сети имеет 4 части: основание, укрепленное на опорных изоляторах, подвижную систему, контактную систему и механизм подъема и опускания.

Контактная система включает полоз, изготовленный из оцинкованной листовой стали толщиной 1,5 мм с закрепленными на нем с помощью латунных винтов токосъемными вставками. Вид и основные размеры полоза токоприемника электровоза однофазного переменного тока представлены на рис. 2. Полоз токоприемника состоит из рабочей части с токосъемными вставками длиной 1270 и 984 мм и двух наклонных частей по 215 мм. На концах стального полоза закреплены наклонные части по 280 мм, изготовленные из диэлектрического материала и предназначенные для защиты контактного провода от возможного попадания под полоз токоприемника. Общая ширина полоза токоприемника составляет 2260 мм.

Токоприемник в системе электрической тяги однофазного переменного тока с напряжением 25 кВ 50 Гц вписывается в габарит подвижного состава.

Впервые [1] в трехфазной системе электрической тяги токосъем «по низу» с двумя воздушными линиями (контактными проводами) и тяговым рельсом в качестве третьей фазы был использован в 1896 г. на трамвайной сети в швейцарском Лугано (трехфазное напряжение 480 В 40 Гц). На первой протяженной железнодорожной линии Бургдорф — Тун длиной 41 км в 1899 г. также применялось низкое напряжение 750 В 40 Гц. В 1902 г. была электрифицирована линия Вальтеллин (Италия)

с ответвлениями общей длиной 106 км, имевшая уже более высокое трехфазное напряжение (3000 В 15,6 Гц).

При повышении напряжения в трехфазной системе электрической тяги с токосъемом «по низу», например до 10 кВ, 25, 35 кВ и выше, необходимо соблюдать изоляционные расстояния между фазами по условиям атмосферных перенапряжений (табл. 1) [3], защита от которых обеспечивается установкой на контактной сети по концам и в середине межподстанционной зоны ограничителей перенапряжений (ОПН).

Кроме напряжения контактной сети, существенное влияние на работу устройств токосъема токоприемника и его габаритные размеры оказывает величина тока.

ТОКИ И ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ТЯГОВЫХ СЕТЯХ ОДНОФАЗНОЙ И ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

В основу расчета тока и потерь мощности в тяговых сетях положено равенство расхода электрической энергии на тягу при существующей однофазной системе электрической тяги переменного тока 25 кВ 50 Гц и перспективной трехфазной системе электрической тяги 3×25 кВ 50 Гц.

Мощность электровозов для этих систем принимается одинаковой и равной мощности часового режима 8400 кВт грузового электровоза с асинхронными тяговыми двигателями (АТД) 2ЭС5 разработки Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения

Таблица 1

Наименьшие расстояния между фазами воздушной линии электропередачи, см

Расчетные условия	Расстояние при напряжении ВЛ, кВ					
	до 10	20	35	110	150	220
По атмосферным перенапряжениям	20	45	50	135	175	250
По внутренним перенапряжениям	22	33	44	100	140	200
По рабочему напряжению	—	15	15	45	60	95

(ВЭЛНИИ) [4] или грузового электровоза 2ЭС7, разработанного заводом «Уральские локомотивы», с максимальной мощностью на валах тяговых двигателей АТД, равной 8800 кВт, и мощностью продолжительного режима 8400 кВт [5, 6].

При однофазной системе электрической тяги 25 кВ 50 Гц в каждой из двух секций электровоза для питания четырех АТД используется преобразовательный агрегат, оборудованный тяговым трансформатором и четырьмя выпрямительными блоками с двухпульсовой однофазной мостовой схемой выпрямления, для которой мощность первичной обмотки тягового трансформатора рассчитывается следующим образом:

$$S_1^{(1)} = U_1 I_1^{(1)} = \frac{U_{d0} \cdot k_T}{k_B} \cdot \frac{I_d \cdot n}{k_T} = \frac{U_{d0} \cdot I_d \cdot n}{0,9} = 1,11 P_d, \quad (1)$$

где U_1 — фазное напряжение первичной обмотки тягового трансформатора кВ; k_T — коэффициент трансформации; k_B — коэффициент выпрямления, равный 0,9; U_{d0} — выпрямленное напряжение холостого хода, кВ; I_d — ток нагрузки выпрямительного блока питания одного АТД, А; n — число АТД одной секции электровоза, равное 4; P_d — мощность одной секции электровоза, кВт.

Отсюда действующее значение однофазного тока в первичной обмотке тягового трансформатора одной секции электровоза будет равно

$$I_1^{(1)} = \frac{1,11 P_d}{U_1}. \quad (2)$$

Ток в проводах тяговой сети соответствует току электровоза, состоящему из двух секций:

$$I_{1\phi}^{(1)} = 2 \frac{1,11 P_d}{U_1}. \quad (3)$$

На электровозе в каждой из двух секций при трехфазной системе электрической тяги 3×25 кВ 50 Гц для питания четырех АТД используется преобразовательный агрегат, оснащенный трехфазным тяговым трансформатором и четырьмя выпрямительными блоками с шестипульсовой трехфазной мостовой схемой выпрямления, для которой мощность первичной обмотки тягового трансформатора определяется по выражению

$$S_1^{(3)} = 3 U_1 I_1^{(3)} = 3 \frac{U_{d0} \cdot k_T}{k_B} \cdot \frac{I_d \cdot n}{k_T} \sqrt{\frac{2}{3}} = 1,05 P_d, \quad (4)$$

где k_B — коэффициент выпрямления, равный 2,34.

Действующее значение тока в одной фазе трехфазной первичной обмотки тягового трансформатора одной секции электровоза равно

$$I_1^{(3)} = \frac{1,05 P_d}{3 U_1} = \frac{0,35 P_d}{U_1}, \quad (5)$$

а двух секций соответственно

$$I_{1\phi}^{(3)} = 2 \frac{0,35 P_d}{U_1}. \quad (6)$$

Соотношение токов в контактной сети двух систем электрической тяги

$$\frac{I_{1\phi}^{(1)}}{I_{1\phi}^{(3)}} = \frac{2 \cdot 1,11 P_d / U_1}{2 \cdot 0,35 P_d / U_1} = \frac{1,11}{0,35} = 3,17 \quad (7)$$

показывает, что ток в контактной сети однофазной системы в 3,17 раза больше, чем фазный ток в каждой фазе a и b контактной сети и тягового рельса фазы c трехфазной системы.

Потери электрической энергии в тяговой сети (контактная сеть и тяговый рельс):

$$\text{в системе ОСЭТ: } \Delta A_{TC}^{(1)} = [I_{1\phi}^{(1)}]^2 R_{TC}^{(1)} \cdot t_T, \quad (8)$$

$$\text{в системе ТСЭТ: } \Delta A_{TC}^{(3)} = 2 [I_{1\phi}^{(3)}]^2 R_{TC}^{(3)} \cdot t_T + [I_{1\phi}^{(3)}]^2 R_{TP}^{(3)} \cdot t_T,$$

где $I_{1\phi}^{(1)}$ — суммарный ток первичных обмоток однофазных тяговых трансформаторов в двух секциях электровоза однофазной системы; $I_{1\phi}^{(3)}$ — суммарный ток любых одинаковых фаз a , b и c первичных обмоток трехфазных тяговых трансформаторов в двух секциях электровоза трехфазной системы;

$R_{TC}^{(1)} = \frac{R_{HT} \cdot R_{KP}}{R_{HT} + R_{KP}} + R_{TP}$ — активное сопротивление тяговой сети (несущего троса R_{HT} , контактного провода R_{KP} , тягового рельса R_{TP}) системы ОСЭТ; $R_{TC}^{(3)} = R_a = R_b \approx R_{TP}$ — активное сопротивление тяговой сети одной фазы a или b (контактного и несущего проводов) или фазы c (тягового рельса) системы ТСЭТ; t_T — время движения под током.

Без учета активных сопротивлений питающих сетей потери электрической энергии в тяговой сети определяются в основном величиной тока в проводах контактной сети (контактном проводе и несущем тросе), а точнее, токами $I_1^{(2)}$.

Соотношение потерь электрической энергии в тяговой сети двух схем электрической тяги

$$\frac{(I_{1\phi}^{(1)})^2}{(I_{1\phi}^{(3)})^2} = \frac{1,11^2}{0,35^2} = \frac{1,2321}{0,3675} = 3,35 \quad (9)$$

показывает, что потери электрической энергии в контактной сети однофазной системы в 3,35 раза больше, чем в трехфазной системе.

Из [5, 6] известно, что ток часового режима при токосъеме с одного токоприемника однофазного электровоза 2ЭС7 составляет 750 А. Соотношение токов в контактной сети двух систем равно 3,17 [формула (7)], и ток часового режима при токосъеме с одного токоприемника трехфазного электровоза составит примерно 1/3 однофазного тока 250 А.

Таким образом, при трехфазной системе электрической тяги мощность энергии токосъема по сравнению с однофазной системой снижается в 3 раза, что приведет к снижению износа токосъемных пластин полоза токоприемника и контактного провода.

ВЛИЯНИЕ ТОКА НА ЭЛЕКТРОЭРОЗИЮ, НА ИЗНОС КОНТАКТНОГО ПРОВОДА И ТОКОСЪЕМНОЙ ВСТАВКИ ПОЛОЗА ТОКОПРИЕМНИКА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В разделе использованы и выделены курсивом материалы книг [7, 8].

На долю токоприемников приходится 16 % всех отказов электрических аппаратов. В свою очередь, на долю токосъемных вставок приходится 31 % всех отказов токоприемника, что позволяет характеризовать токосъемную вставку как один из наиболее уязвимых элементов, надежность которого является определяющим фактором надежности локомотива в целом. Отказы токосъемных вставок происходят в основном из-за их износа.

В силовом точном скользящем контакте, образованном контактным проводом и токосъемными вставками полозов токоприемников, токосъем сопровождается появлением электрических дуг и маломощных искровых разрядов, вызывающих повреждение (эрозию), т.е. протекание электрического тока через скользящие контакты сопровождается эрозионными процессами их поверхности, возникающими при токосъеме.

Эрозия контактов объясняется вырыванием частиц под действием струй металла с противоположного электрода, бомбардировкой ионами и электронами, тепловыми процессами.

При этом необходимо учитывать, что тепловая энергия, выделяющаяся от электрической дуги, сосредоточена в ее опорных точках на контактах. Под действием выделяющейся тепловой энергии металл контактов расплавляется, закипает, испаряется и разбрызгивается, что приводит к их износу. При этом электроэрозия контактов возрастает при повышении длительности электрического разряда и увеличении тока.

По данным немецких специалистов, даже в обычных эксплуатационных условиях практически 80 % общего износа обусловлено электроэрозией и только 20 % — механическими воздействиями. Таким образом, при использовании углеродных материалов решающим является электрический износ. Это подтверждается практикой их применения.

В Японии было установлено, что на тех участках железных дорог, где на электроподвижном составе применялись угольные вставки, годовой износ контактного провода достигал 0,21, 0,25 и 0,171 мм, а при отсутствии токосъема — соответственно 0,145, 0,131 и 0,051 мм. Средний годовой износ контактного провода с угольными токосъемными вставками составил

$$\frac{1}{3} \cdot (0,21 + 0,25 + 0,171) = 0,21 \text{ мм, а при отсутствии токосъема } \frac{1}{3} \cdot (0,145 + 0,131 + 0,051) = 0,109 \text{ мм, т.е. износ}$$

материала контактного провода или токосъемной вставки под воздействием токовой нагрузки возрастает и для рассмотренного примера вырос в 1,93 раза. Также в Японии при натурных испытаниях контактного провода и токосъемных элементов полозов токоприемников установлено, что износ скользящего контакта зависит от длительности воздействия дуги и тока разряда.

Аналогичные результаты были получены на российских железных дорогах. Так, на участках постоянного тока при прохождении только электропоездов, т.е. при малых снимаемых токах, износ контактного провода достигает 0,069 мм² на 10⁴ проходов ЭПС. Если доля электровозной тяги (рис. 3) возрастает на 35, 50 и 67 %, т.е. снимаются большие токи, износ увеличивается соответственно до 0,104, 0,158,

$$0,204 \text{ мм}^2 \text{ на } 10^4 \text{ проходов ЭПС, или в } \frac{0,104}{0,069} = 1,51; \frac{0,158}{0,069} = 2,29 \text{ и } \frac{0,204}{0,069} = 2,957 \text{ раза.}$$

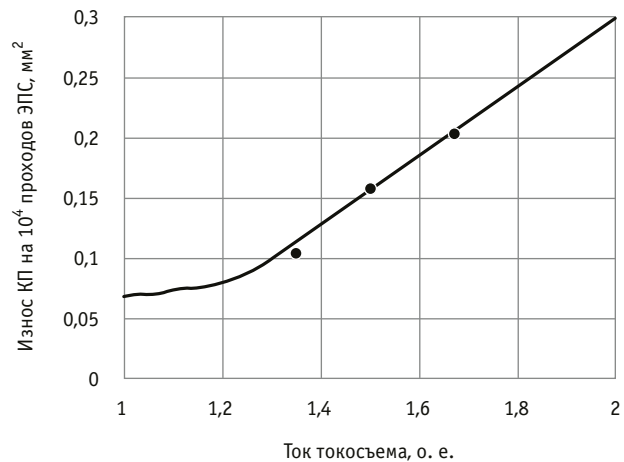


Рис. 3. График износа контактного провода в зависимости от тока токосъема

При повышении тока происходит более высокий нагрев углеродных вставок полоза и контактного провода, усиливаются электроэрозионные процессы, и, следовательно, повышается интенсивность электрической составляющей износа контактного провода и вставок.

Следует отметить, что большинство исследований связывает электроэрозию контактов с тепловой природой этого явления [7]. За время t протекание тока i через сопротивление контакта r между контактным проводом и токосъемной вставкой выделяется тепловая энергия, которая в соответствии с законом Джоуля — Ленца $Q = i^2 r t$ зависит в основном от квадратичного значения тока нагрузки и может быть представлена графиком показательной функции $y = a^x$, где a — положительное основание, x — целое число (при $x = 2$ функция показательная, квадратичная).

Рассмотрим возможность оценки коэффициента износа контактного провода по изменению в законе Джоуля — Ленца квадратичной функции i^2 .

На рис. 4 представлены экспериментальный график коэффициента износа контактного провода, определенный по ранее полученному в России износу контактного провода (см. рис. 3), и расчетный график квадратичной функции i^2 тока токосъема при его увеличении от малых снимаемых величин (в диапазоне 1–1,2 о.е.) на 35, 50 и 67 %. Величины этих коэффициентов приведены в табл. 2.

Величины экспериментальных и расчетных значений коэффициента износа контактного провода практически совпадают и позволяют оценить в о.е. степень износа контактного провода и соответственно токосъемных вставок при изменении токов токосъема токоприемником с контактного провода.

Например, уменьшение токов токосъема с 2 до 1,2 о.е. (в 1,67 раза) ведет к снижению коэффициента износа с 4 до 1,44 о.е. (в 2,78 раза), что позволяет при разработке электровоза с трехфазной электрической тягой уменьшить габариты токоприемника.

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТОКОСЪЕМА И ЗИГЗАГА ПОДВЕСКИ КОНТАКТНОГО ПРОВОДА НА ГАБАРИТ ТОКОПРИЕМНИКА

Габарит токоприемника определяется шириной рабочей части полоза (см. рис. 2) и принятого норматива зигзага при подвеске контактного провода. Зигзаг вводится для снижения отказов полоза и соответственно токоприемника за счет увеличения площади взаимодействия поверхностей токосъемных вставок полоза с увеличенным по длине контактным проводом.

Схема и расчет длины пути скольжения $l_{ск}$ полоза токоприемника по контактному проводу с зигзагом величиной a в пролете контактного провода длиной $l_{пр}$ показаны на рис. 5.

Порядок расчета длины пути скольжения $l_{ск}$ и скорости скольжения токосъемных вставок полоза токоприемника $V_{пол}$ следующий:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a}{l} = \frac{a \cdot 2}{l_{пр}}$$

где a — зигзаг контактного провода;

$$l_{ск} = \frac{a}{\sin \alpha};$$

$$V_{пол} = \frac{l_{ск} \cdot 2}{T_{пол}},$$

где $T_{пол}$ равно времени хода электровоза на длине $l_{пр}$

$$T_{пол} = T_{эл} = \frac{l_{пр}}{V_{эл}},$$

откуда $V_{пол} > V_{эл}$.

Снижение габарита полоза и соответственно токоприемника может быть достигнуто уменьшением зигзага контактного провода, основанном на уменьшении снимаемого с контактного провода тока, и, следовательно, снижением интенсивности износа токосъемных вставок и контактного провода.

С другой стороны, уменьшение зигзага контактного провода ведет к увеличению износа элементов скользящего контакта.

При большой скорости движения токосъемной вставки (полоза) по контактному проводу зигзага время интенсивного воздействия большого тока токосъема на малую i -ю единицу площади вставки незначительно; далее контакт с токоприемником переходит на другую $i+1$ -ю малую единицу площади вставки, а малая i -я единица площади вставки начинает охлаждаться.

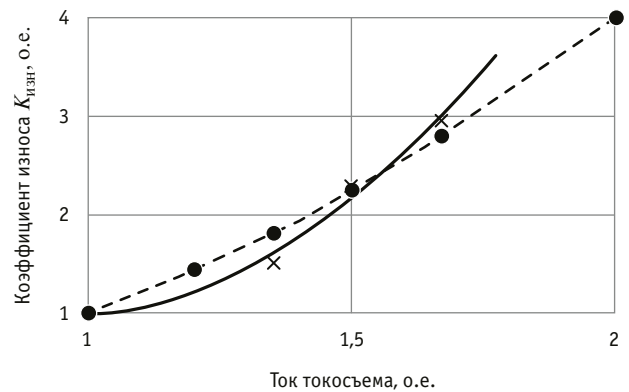


Рис. 4. Графики коэффициента износа в зависимости от токосъема: × — — — — экспериментальный график; • — — — — расчетный

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные величины коэффициента износа контактного провода в зависимости от тока токосъема

Ток токосъема, о.е.	Коэффициент износа $K_{изн}$, о.е.	
	Экспериментальный $K_{изн, э}$	Расчетный $i^2 K_{изн, р}$
1–1,1	1	1
1,2	–	1,44
1,35	1,51	1,8
1,5	2,29	2,25
1,67	2,957	2,8
2	–	4

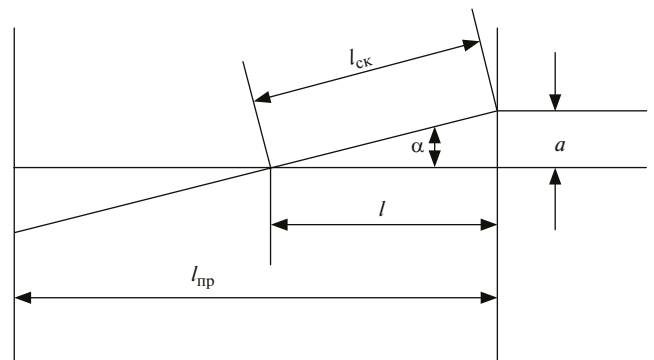


Рис. 5. Схема одного пролета контактного провода с зигзагом

Казалось бы, все хорошо — время токового интенсивного воздействия мало, однако и величина тока большая (соответствует большой скорости движения электровоза), и температура разогрева скользящего контакта большая, а затем происходит следующий цикл в другом пролете контактного провода. В результате имеем произведение большой величины i^2 на малую величину времени интенсивного токового воздействия.

При меньшей скорости движения электровоза (соответствует малому току токосъема) скорость полоза уменьшается,

а время интенсивного токового воздействия на i -е малые единицы площади токосъемной вставки увеличивается. В результате имеем произведение малой величины i^2 на большую величину времени интенсивного токового воздействия.

В обоих случаях произведение $i^2 t$ характеризуется средней величиной, в большей степени зависящей от тока токосъема, что и подтверждается исследованиями, выполненными в Германии, Японии и России [7]: токи меньше — износ меньше.

Отсюда вывод: при оценке выбора малогабаритного токоприемника определяющими являются токосъем и уменьшение зигзага контактного провода, а для двух токоприемников на крыше корпуса электровоза — соблюдение требуемых междупазных расстояний.

ВЫБОР РАЗМЕРОВ ПОЛОЗА ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОГО ТОКОПРИЕМНИКА ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

В трехфазной системе электрической тяги на крыше кузова электровоза должны быть размещены два токоприемника меньших габаритов, чем габарит токоприемника электровоза однофазного переменного тока.

Известно, что основной элемент токоприемника, обеспечивающий надежную работу электрической части электровоза, — полоз с закрепленными на нем токосъемными вставками, материал которых должен обладать высокими механическими и антифрикционными свойствами, низким удельным переходным сопротивлением, высокими электроэрозионной стойкостью и теплопроводностью.

Площадь токосъемных вставок, зависящая от снимаемого с контактного провода тока и длительности его интенсивного воздействия на скользящий контакт вставки и контактного провода, располагается на рабочей части полоза и определяет размеры последнего и габариты токоприемника.

Ток токосъема с одного контактного провода вставками одного полоза токоприемника электровоза переменного тока трехфазной системы электрической тяги составляет 250 А. Для определения размеров полоза малогабаритного токоприемника в качестве исходного принят полоз токоприемника электровоза однофазного переменного тока с обеспечением токосъема с контактного провода 750 А. Снижение габарита исходного полоза связано с уменьшением тока малогабаритного токоприемника с 750 до 250 А, т. е. в 3 раза.

Этапы и размеры уменьшения в о.е. исходного полоза до получения размеров требуемого полоза малогабаритного токоприемника представлены на рис. 6–9.

Полоз токоприемника электровоза однофазного переменного тока с токосъемом 750 А предусмотрен в работе скользящего контакта с контактным проводом, подвешенным с зигзагом на прямом и кривом ($R > 2000$ м) участках пути, — 300 ± 30 мм, максимальный — до ± 400 мм; на кривом участке пути ($R \leq 2000$ м) — до 400 ± 30 мм, максимальный — до ± 500 мм [9].

Ширина вставки полоза равна 984 мм, максимальная длина по размерам двух зигзагов $2 \times 400 = 800$ мм, что составит запас по ширине вставки $\frac{984 - 800}{984} \cdot 100 = 18,7\%$.

Максимальный зигзаг контактного провода для всех этапов уменьшения размера полоза (в 1,5; 1,75; 2 раза) принят ± 200 мм; максимальная длина двух зигзагов равна $2 \times 200 = 400$ мм, и при ширине вставок 656, 562, 492 мм запас по ширине вставок составит соответственно:

$$\frac{656 - 400}{656} \cdot 100 = 39\%;$$

$$\frac{562 - 400}{562} \cdot 100 = 28,8\%;$$

$$\frac{492 - 400}{492} \cdot 100 = 18,7\%.$$

Запас 18,7 % при ширине вставки 492 мм соответствует запасу 18,78 % при ширине вставки 984 мм исходного полоза токоприемника.

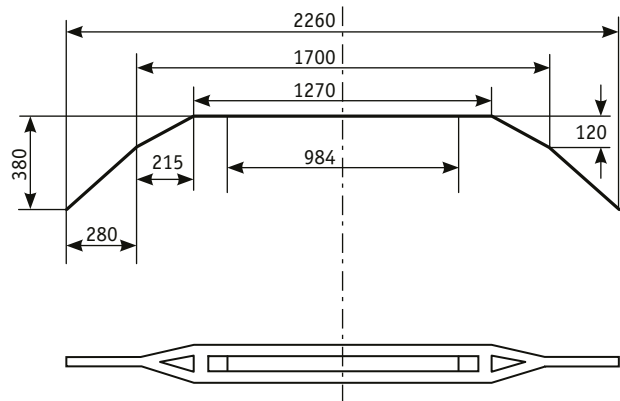


Рис. 6. Вид и размеры исходного полоза токоприемника электровоза с однофазным питанием от контактного провода с зигзагом ± 300 мм

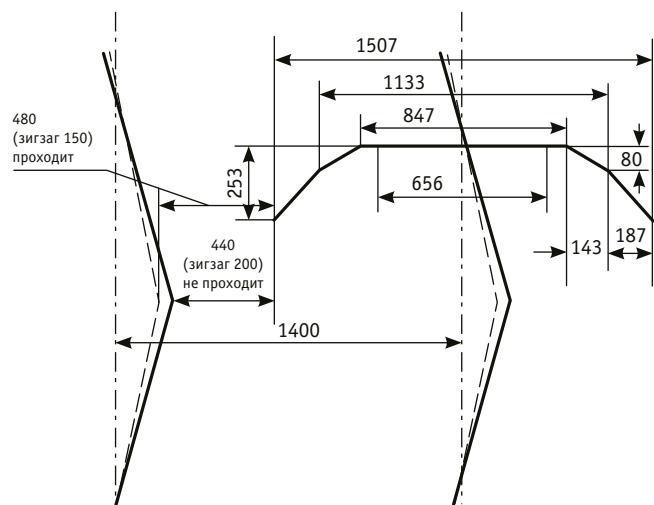


Рис. 7. Размеры полоза токоприемника, уменьшенного в 1,5 раза от исходного, на электровозе трехфазного питания от двух контактных проводов с зигзагом ± 200 мм и тяговым рельсом

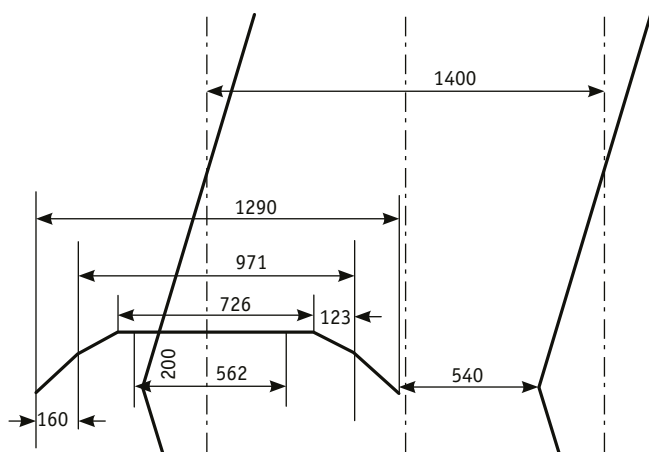


Рис. 8. Размеры полоза токоприемника, уменьшенного в 1,75 раза от исходного, на электровозе трехфазного питания от двух контактных проводов с зигзагом ± 200 мм и тяговым рельсом

Для защиты от попадания контактного провода под полоз токоприемника (как отмечено ранее) к наклонной металлической части полоза крепится дополнительная наклонная часть из диэлектрического материала, увеличивающая ширину полоза на 560 (2×280) мм (см. рис. 6). Такое удлинение недопустимо при уменьшении размеров полоза токоприемника в 1,5 раза (см. рис. 7) и в 1,75 раза (см. рис. 8) при несоблюдении междуфазных по атмосферным перенапряжениям до 30 кВ расстояний менее 48 см (см. табл. 1) и допустимо при уменьшении размеров полоза в 2 раза при междуфазном расстоянии 50 см.

Сведения об авторах:

Борис Алексеевич Аржанников, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения

Игорь Станиславович Цихалевский, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения

Литература

1. Frey Sh. Railway Electrification Systems & Engineering. Delhi : WhiteWord Publications, 2012. 145 p.
2. Аржанников Б. А. Основные положения трехфазной системы электрической тяги : монография. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2023. 263 с.
3. Справочник по проектированию электроснабжения. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 576 с.
4. Орлов Ю. А., Янов В. П. Грузовой электровоз переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями // Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте : материалы 5-го международного симпозиума «Элтранс-2009», Санкт-Петербург, 20–23 октября 2009 г. Санкт-Петербург : ПГУПС, 2009.
5. Перспективный грузовой электровоз переменного тока с асинхронным тяговым приводом 2ЭС7. Электровоз магистраль-

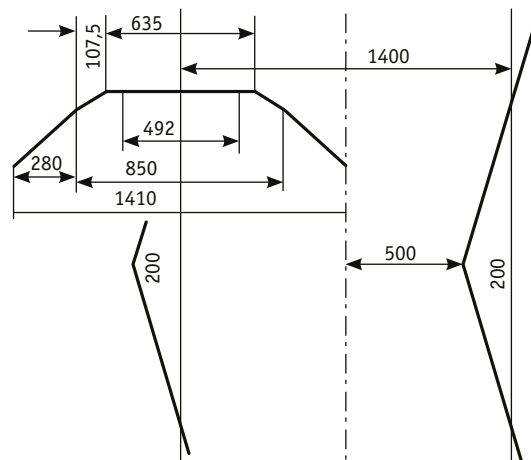


Рис. 9. Размеры полоза токоприемника, уменьшенного в 2 раза от исходного, на электровозе трехфазного питания от двух контактных проводов с зигзагом ± 200 мм и тяговым рельсом

Таким образом, для рассмотрения к применению в малогабаритном токоприемнике может быть представлен полоз, имеющий следующие характеристики: уменьшенный в 2 раза по сравнению с полозом токоприемника однофазного электровоза переменного тока размер; уменьшенный в 3 раза (250 А вместо 750 А) ток токосъемных вставок; ширина токосъемных вставок, соответствующая зигзагу контактной сети ± 200 мм; уменьшенный в 1,5 раза (300 ± 30 мм) запас ширины токосъемных вставок, соответствующий запасу однофазного электровоза переменного тока.

Authors information:

Boris A. Arzhannikov, DSc in Engineering, Professor, Professor of Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport

Igor S. Tikhalevskiy, PhD in Engineering, Associate Professor of Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport

References

1. Frey Sh. Railway Electrification Systems & Engineering. Delhi : WhiteWord Publications, 2012. 145 p.
2. Arzhannikov B. A. Basic provisions of three-phase alternating current system of electric traction : monograph. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2023. 263 p. (In Russian).
3. Handbook of power supply design. Moscow : Energoatomizdat, 1990. 576 p. (In Russian).
4. Orlov Yu. A., Yanov V. P. AC freight electric locomotive with asynchronous traction motors. *Electrification, innovative technologies, speed and high-speed rail transport* : proceedings of the 5th International symposium Eltrans-2009, St. Petersburg, October 20–23, 2009. St. Petersburg : PSTU, 2009. (In Russian).
5. A promising AC freight electric locomotive with asynchronous traction drive 2ES7. Mainline freight electric locomotive of al-

ный грузовой переменного тока : техническое задание, утв. ООО «Уральские локомотивы», Siemens 15.02.2012 г.

6. Покорение Сибири // Гудок. 2017. 20 апр.
7. Берент В. Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта. Москва : Интекст, 2005. 408 с.
8. Берент В. Я. Сильноточный скользящий контакт (свойства, повреждаемость и процессы, протекающие в нем). Ногинск : АНАЛИТИКА РОДИС, 2016. 330 с.
9. Борц Ю. В., Чекулаев В. Е. Контактная сеть. Москва : Транспорт, 2001. 247 с.

ternating current : technical specification, approved by Ural Locomotives LLC, Siemens dated 15.02.2012. (In Russian).

6. The Conquest of Siberia. *Gudok*. April 20, 2017. (In Russian).
7. Berent V. Ya. Materials and properties of electrical contacts in railway transport devices. Moscow : Intext, 2005. 408 p. (In Russian).
8. Berent V. Ya. High-current sliding contact (properties, damage and processes occurring in it). Noginsk : ANALYTICS RODIS, 2016. 330 p. (In Russian).
9. Borts Yu. V., Chekulaev V. E. Contact network. Moscow : Transport, 2001. 247 p. (In Russian).

Объем статьи 0,82 авторских листа

Научная статья

УДК 621.331: 621.311.4: 621.314.5

Анализ особенностей конструктивного исполнения и направления совершенствования многопульсовых выпрямительно-инверторных преобразователей для тяговых подстанций железных дорог

 Юрий Павлович Неугодников¹, Иван Павлович Неугодников¹
¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

Analyses of the peculiarities of the structural embodiment of the improvement of multi-pulse rectifying-inverting converters for railways traction substations

 Yuriy P. Neugodnikov¹, Ivan P. Neugodnikov¹
¹Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

В статье рассмотрены параметры, характеристики, энергетические показатели, особенности конструктивного исполнения и режимы работы многопульсовых инверторных и выпрямительно-инверторных преобразователей для тяговых подстанций. Эти преобразователи предназначены для повышения энергетической эффективности и надежности работы системы тягового электроснабжения постоянного тока, в том числе на участках электрических железных дорог с тяжеловесным и высокоскоростным движением поездов. Показаны основные преимущества использования 12-пульсовых схем инвертирования по сравнению с 6-пульсовыми. Предложены направления дальнейшего совершенствования многопульсовых инверторных и выпрямительно-инверторных преобразователей для тяговых подстанций.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, тяга поездов, тяговые подстанции, рекуперативное торможение, энергия рекуперации, инверторы, выпрямительно-инверторные преобразователи, тиристоры

Abstract

The article considers the parameters, characteristics, energy indicators, peculiarities of the structural embodiment and the regimes of work of multi-pulse inverting and rectifying-inverting converters for traction substations. These converters are intended to increase the energy efficiency and the safety of the work of the system of the traction DC electric power supply including the areas of the electric railways with heavy and high-speed railway traffic. The main advantages of the use of 12-pulse circuits of inverts in comparison to 6-pulse ones have been presented. The directions for further improvement of the multi-pulse inverting and rectifying-inverting converters for traction substations have been suggested.

Keywords: traction electric supply system, train traction, traction substations, regenerative braking, energy recovery, inverters, rectifying-inverting converters, thyristors

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-100-108

В соответствии с энергетической стратегией ОАО «РЖД» предусматривается разработка новых технических решений, направленных на повышение эффективности, надежности и расширение полигона применения рекуперативного торможения электроподвижного состава, что позволит не только сэкономить электроэнергию, но и одновременно обеспечить требуемый уровень безопасности движения поездов [1, 2].

На тяговых подстанциях постоянного тока для приема избыточной электроэнергии рекуперации устанавливают выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП), в том числе инверторные преобразователи (ИП) и выпрямительные преобразователи (ВП) [3–5].

ВИП и ИП представляют собой наиболее сложное и дорогостоящее оборудование тяговых подстанций, состоящее из трансформаторов, выпрямителей, инверторов, систем управления, диагностики и защиты инверторов, токоограничивающих и помехозащитных реакторов, быстродействующих выключателей, разрядных устройств, разъединителей и другого оборудования [3–5].

Для применения на тяговых подстанциях постоянного тока электрических железных дорог в разные периоды были созданы и введены в эксплуатацию несколько типов многопульсовых полупроводниковых ВИП и ИП, рассматриваемых ниже.

Полупроводниковые преобразователи ВИПЭ-1 на тиристорах совместно разработаны научными сотрудниками ВНИИЖТ и специалистами ТЭЗ [3, 4]. В выпрямительном и инверторном режимах работы ВИПЭ-1 рассчитан на номинальное напряжение 4000 В и номинальный ток 2000 А. ВИПЭ-1 выполнен по 6-пульсовой нулевой схеме преобразования электроэнергии. При этом он подключается к преобразовательному трансформатору ТДРУ-20000/10И с питающим первичным напряжением, равным 10,5 и 6,3 кВ. Преобразователь ВИПЭ-1 (по 6-пульсовой нулевой схеме) имеет шесть тиристорных плеч (тиристорных фаз), которые конструктивно размещены

в шести тиристорных шкафах. Каждое тиристорное плечо состоит из 60 тиристорных блоков, включенных между собой: 10 последовательно и 6 параллельно. В свою очередь, каждое тиристорное плечо преобразователя разделено на три группы тиристорных блоков: инверторную — 18 блоков (3 последовательно и 6 параллельно), выпрямительную — 12 блоков (2 последовательно и 6 параллельно) и общую — 30 блоков (5 последовательно и 6 параллельно). Силовые тиристорные блоки состоят из трех последовательно соединенных штыревых лавинных тиристоров ТЛ-150-6 на токи 150 А. Таким образом, преобразователь ВИПЭ-1 выполнен с применением достаточно большого количества штыревых лавинных тиристоров — 1080, в том числе в инверторных группах — 324, в выпрямительных — 216, в общих — 540. У преобразователей ВИПЭ-1 реализовано принудительное воздушное охлаждение тиристор-ов с применением цельнолитых ребристых охладителей [3, 4].

Полупроводниковые преобразователи типа ВИПЭ-2У3 также совместно разработаны научными сотрудниками ВНИИЖТ и специалистами ТЭЗ [3, 4]. Тиристорные шкафы инверторной части преобразователя ВИПЭ-2У3 рассчитаны на номинальное напряжение 3800 В и номинальный ток 1600 А. Диодные шкафы выпрямительной части преобразователя ВИПЭ-2У3 разработаны на номинальное напряжение 3300 В и номинальный ток 3000 А. Максимальное напряжение, на которое рассчитаны инверторная и выпрямительная части, составляет 4000 В. Преобразователь ВИПЭ-2У3 выполнен по 6-пульсовой мостовой схеме преобразования электроэнергии и подключается к преобразовательному трансформатору ТДП-12500/10ИУ1 с питающим первичным напряжением, равным 10,5 и 6,3 кВ. В качестве диодных шкафов выпрямительной части преобразователя ВИПЭ-2У3 используется серийно выпускаемый диодный выпрямитель внутренней установки ПВЭ-3М, состоящий из двух диодных шкафов и имеющий принудительное воздушное охлаждение. Каждое из шести диодных плеч (диодных фаз) выпрямителя ПВЭ-3М содержит 9 последовательно и 10 параллельно включенных штыревых лавинных диодов ВЛ-200-8 на токи 200 А. Таким образом, выпрямитель ПВЭ-3М выполнен с применением 540 штыревых лавинных диодов [3, 4]. Инверторная часть преобразователя ВИПЭ-2У3 (по 6-пульсовой мостовой схеме) имеет шесть тиристорных плеч (тиристорных фаз), которые конструктивно размещены в трех тиристорных шкафах (рис. 1).

Каждое из шести тиристорных плеч (тиристорных фаз) состоит из 60 тиристоров ТЛ-320-12 с повышенными динамическими характеристиками на токи 320 А, которые включены между собой по 10 последовательно и по 6 параллельно. Таким образом, инверторная часть преобразователя ВИПЭ-2У3 выполнена с применением 360 тиристоров. У преобразователей ВИПЭ-2У3 реализовано принудительное воздушное охлаждение тиристор-ов с использованием цельнолитых ребристых охладителей [3, 4].

Инвертор типа И-ПТП-2,4к-4к-3/12(6)-У3 совместно разработан научными сотрудниками ВНИИЖТ и УрГУПС, а также специалистами НПО «Электротехника» [4, 5]. Инвертор И-ПТП-2,4к-4к-3/12(6)-У3 рассчитан на номинальное напряжение 4000 В и номинальный ток 2400 А. Силовые тиристор-

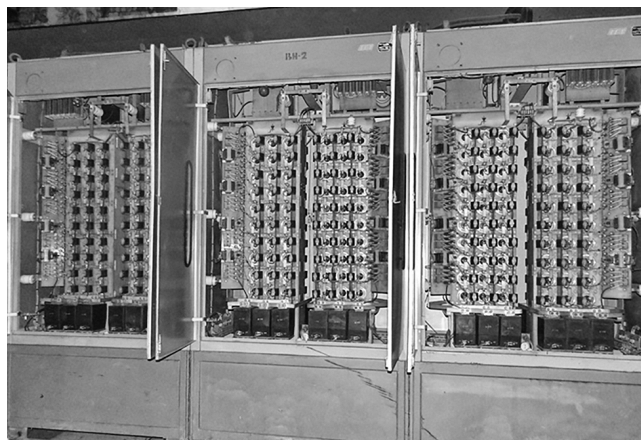


Рис. 1. Тиристорные шкафы инверторной части выпрямительно-инверторного преобразователя ВИПЭ-2У3

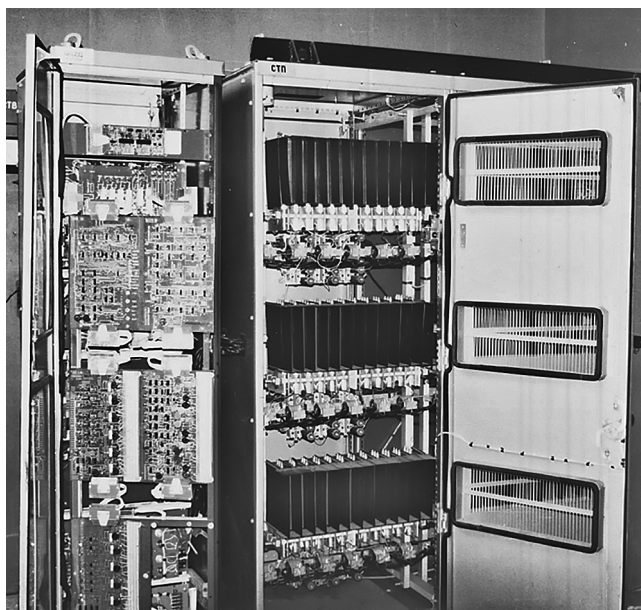


Рис. 2. Тиристорная секция инвертора типа И-ПТП-2,4к-4к-3/12(6)-У3

ные секции инвертора И-ПТП-2,4к-4к-3/12(6)-У3 выполнены по 6- и 12-пульсовым мостовым схемам преобразования электроэнергии (рис. 2) и состоят из шести тиристорных блоков.

При реализации 6-пульсовой мостовой схемы преобразования электроэнергии инвертор И-ПТП-2,4к-4к-3/12(6)-У3 подключается к преобразовательному трансформатору ТДП-12500/10ИУ1 с питающим первичным напряжением, равным 10,5 и 6,3 кВ. В случае реализации 12-пульсовой мостовой схемы И-ПТП-2,4к-4к-3/12(6)-У3 подключается к специально созданному для него научными сотрудниками ВНИИЖТ, УрГУПС и специалистами ОАО «Уралэлектротяжмаш» преобразовательному трансформатору ТРДТП-20000/35ИУ1 с питающим первичным напряжением, равным 35, 10,5 и 6,3 кВ. Тиристорные блоки разработаны с применением мощных таблеточных тиристор-ов высокого класса типа Т253-1250-18 на токи

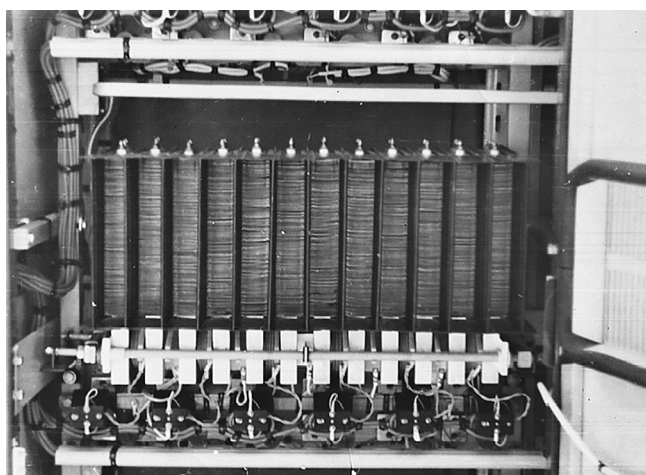


Рис. 3. Тиристорный блок инвертора И-ПТП-2,4к-4к-3/12(6)-УЗ

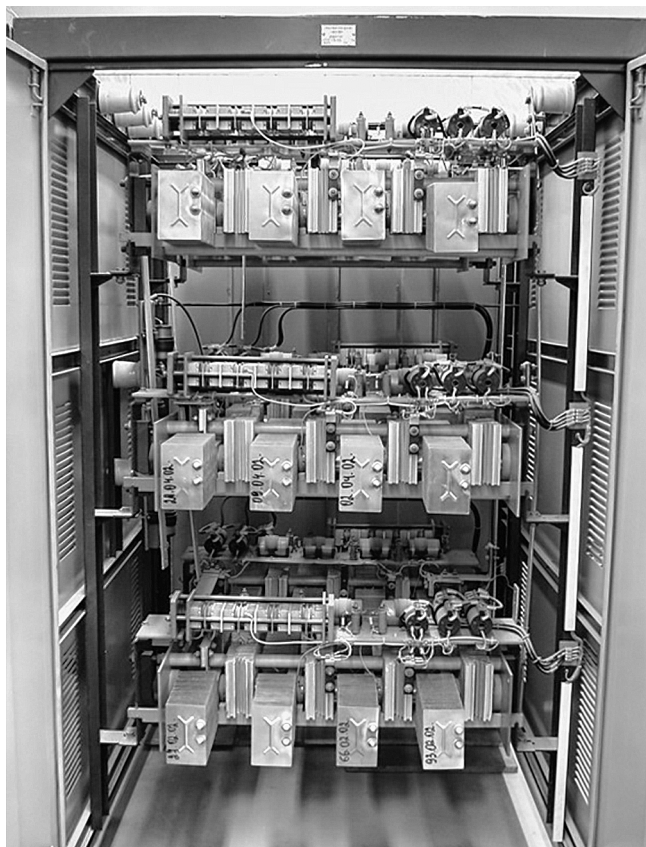


Рис. 4. Тиристорная секция инвертора И-ПТЕТ-0,8к-3,6к-1(2)-УЗа

1250 А (рис. 3). Каждый тиристорный блок реализует либо одно тиристорное плечо (одну тиристорную фазу) из шести последовательно соединенных тиристоров при 6-пульсовой, либо два тиристорных плеча (две тиристорных фазы) из трех последовательно соединенных тиристоров при 12-пульсовой мостовой схеме преобразования электроэнергии.

Таким образом, в конструкции инвертора И-ПТП-2,4к-4к-3/12(6)-УЗ даже при номинальном токе в 1,5 раза выше, чем

у инверторной части преобразователя ВИПЭ-2УЗ, применено в 10 раз меньшее количество тиристоров — всего 36. Для защиты тиристоров от перенапряжений параллельно каждому из них включены два встречно соединенных лавинных диода ДЛ123-320-13. У инвертора типа И-ПТП-2,4к-4к-3/12(6)-УЗ реализовано принудительное воздушное охлаждение тиристоров с применением специальных охладителей на тепловых трубах Т1317 [4, 5].

Инвертор типа И-ПТЕТ-0,8к-3,6к-1(2)-УЗа совместно разработан научными сотрудниками ВНИИЖТ и УрГУПС, а также специалистами ОЗ «ВЭИ» и ОАО «ЕРЗ» [6, 7]. Инвертор И-ПТЕТ-0,8к-3,6к-1(2)-УЗа рассчитан на номинальное напряжение 3600 В и номинальный ток 800 А. Допускаются кратковременные импульсные перегрузки по току: 1500 А в течение 5 с, 3000 А в течение 5 с периодичностью не менее 4 мин. Максимальное напряжение, на которое рассчитан инвертор, составляет 4000 В. Силовые тиристорные секции инвертора И-ПТЕТ-0,8к-3,6к-1(2)-УЗа выполнены по 6- и 12-пульсовым мостовым схемам преобразования электроэнергии (рис. 4) и состоят из шести тиристорных блоков, разработанных с применением мощных таблеточных тиристоров высокого класса Т653-800-24 на токи 800 А 24-го класса и выше (рис. 5). Каждый тиристорный блок реализует либо одно тиристорное плечо (одну тиристорную фазу) из четырех последовательно соединенных тиристоров при 6-пульсовой, либо два тиристорных плеча (две тиристорных фазы) из двух последовательно соединенных тиристоров в каждом при 12-пульсовой мостовой схеме преобразования электроэнергии. Таким образом, в конструкции инвертора И-ПТЕТ-0,8к-3,6к-1(2)-УЗа используется 24 тиристора. У инвертора типа И-ПТЕТ-0,8к-3,6к-1(2)-УЗа для защиты тиристоров от перенапряжений параллельно каждому из них включены два встречно соединенных лавинных диода типа ВЛ-320-16(18) 16(18)-го класса. Для инвертора И-ПТЕТ-0,8к-3,6к-1(2)-УЗа реализовано естественное воздушное охлаждение тиристоров с совместным применением как цельнолитых ребристых охладителей тиристоров О153-150, так и специальных охладителей тиристоров на тепловых трубах О172-626-УЗ [6, 7].

Для сокращения капитальных затрат при модернизации тиристорных преобразователей на тяговых подстанциях постоянного тока электрических железных дорог специалистами ОЗ «ВЭИ» разработаны силовые тиристорные блоки БСЕ1-ЗИТ8-18(20) [4, 7]. Они рассчитаны на номинальное напряжение не более 2000 В и номинальный ток 533 А. Допускаются кратковременные импульсные перегрузки по току в следующих режимах:

продолжительность 15 мин, цикличность 1 раз в 2 ч — 666 А;
 продолжительность 2 мин, цикличность 1 раз в 1 ч — 800 А;
 продолжительность 10 с, цикличность 1 раз в 2 мин — 1066 А.

При этом средний ток за сутки не должен превышать номинальное значение. Максимальное значение перенапряжения (амплитудное значение), на которое рассчитаны тиристорные блоки, составляет 4250 В [4, 7]. Тиристорные блоки БСЕ1-ЗИТ8-18(20) разработаны с использованием мощных таблеточных тиристоров высокого класса типа Т373-2000-18(20)

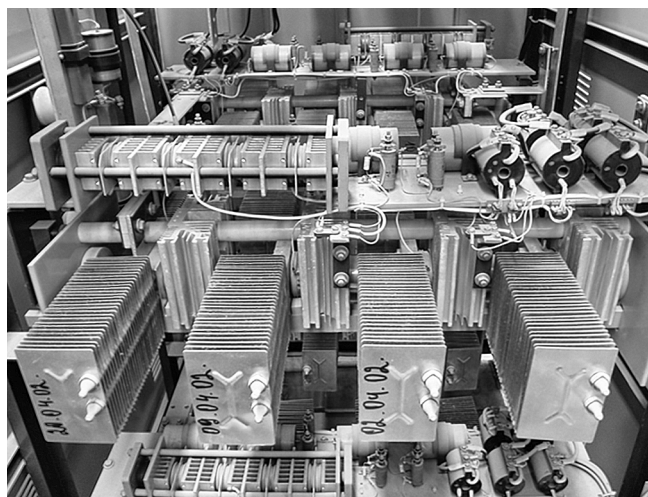


Рис. 5. Тиристорный блок инвертора И-ПТЕТ-0,8к-3,6к-1(2)-У3а

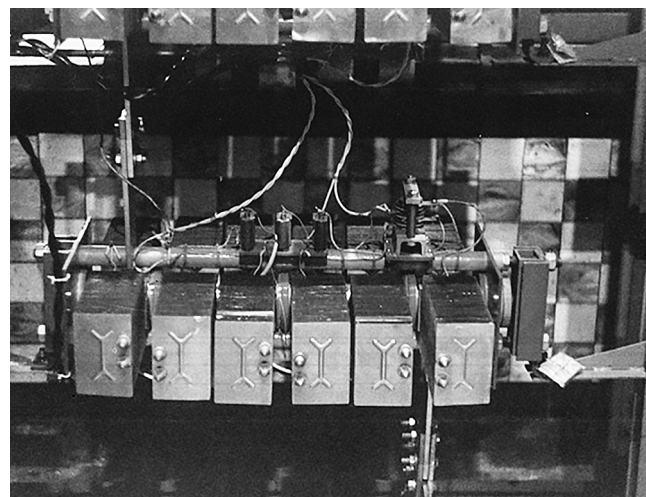


Рис. 6. Тиристорный блок силовой с естественным охлаждением
БСЕ1-ЗИТ8-18(20)

на токи 2000 А 18(20)-го класса и выше (рис. 6). Каждый тиристорный блок реализует одно тиристорное плечо (одну тиристорную фазу) из трех последовательно соединенных тиристоров для реализации 12-пульсовой мостовой схемы преобразования электроэнергии. Таким образом, при модернизации на тяговых подстанциях тиристорных преобразователей по 12-пульсовой мостовой схеме в их конструкции должно быть применено 12 тиристорных блоков с общим количеством 36 тиристоров. В тиристорных блоках БСЕ1-ЗИТ8-18(20) для защиты от перенапряжений параллельно каждому тиристорному плечу включены два встречно соединенных лавинных диода ВЛ-320-16 16-го класса. Для тиристорных блоков БСЕ1-ЗИТ8-18(20) реализовано естественное воздушное охлаждение с применением специальных охладителей на тепловых трубах 0172-626-У3 или Т341-017 [4, 7].

С целью модернизации инверторных преобразователей на тяговых подстанциях научными сотрудниками УрГУПС совместно со специалистами ОЗ «ВЭИ» и работниками Свердловской железной дороги силовые тиристорные блоки БСЕ1-ЗИТ8-18(20)-У3а были вмонтированы в тиристорные шкафы преобразователя ВИПЭ-2У3. При модернизации научные сотрудники УрГУПС разработали и изготовили специальные платы для контроллеров управления, регулирования и защиты инвертора, которые монтировались в шкафах управления преобразователя ВИПЭ-2У3.

Для примера на рис. 7 представлен общий вид модернизированного инвертора с тиристорными блоками БСЕ1-ЗИТ8-18(20)-У3а, вмонтированными в трех тиристорных шкафах преобразователя ВИПЭ-2У3, размещение силового оборудования показано на рис. 8.

При 6-пульсовой мостовой схеме преобразования электроэнергии модернизированный инвертор подключается к преобразовательному трансформатору ТДП-12500/10ИУ1 с питающим первичным напряжением, равным 10,5 и 6,3 кВ, а при 12-пульсовой мостовой схеме — к преобразовательному трансформатору ТРДТП-20000/35ИУ1 с питающим первичным напряжением 35, 10,5 и 6,3 кВ.

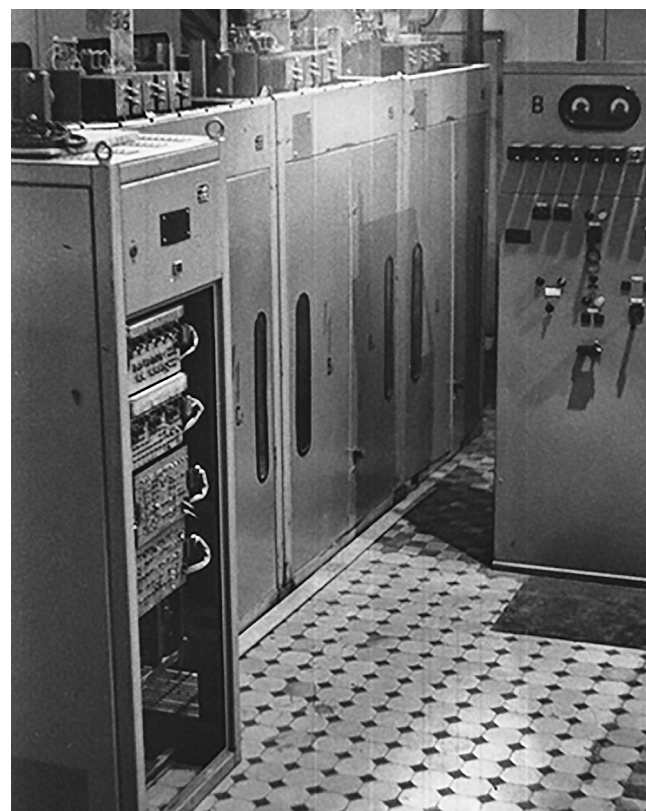


Рис. 7. Общий вид инвертора, модернизированного
с использованием тиристорных блоков БСЕ1-ЗИТ8-18(20)-У3а
при их монтаже в тиристорных шкафах ВИПЭ-2У3

На базе силовых тиристорных блоков БСЕ1-ЗИТ8-18(20)-У3а научными сотрудниками ВНИИЖТ и УрГУПС, а также специалистами ОЗ «ВЭИ» и ОАО «ЕРЗ» совместно разработан инвертор И-ПТЕТ-1,6к-4к-12(6)-У3а [4, 7], рассчитанный на номинальное напряжение 4000 В и номинальный ток 1600 А. Силовые тиристорные секции инвертора выполнены по 6- и 12-пульсовым

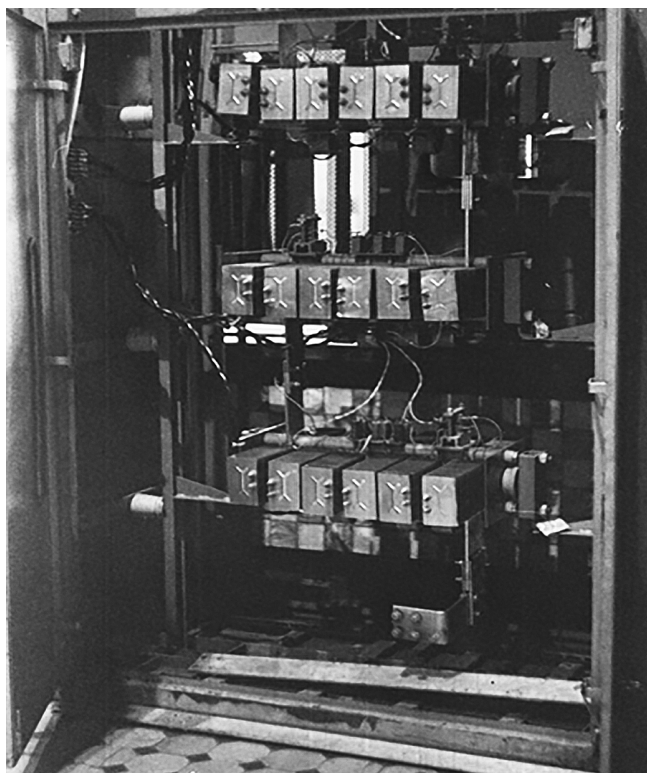


Рис. 8. Тиристорный шкаф модернизированного инвертора

мостовым схемам преобразования электроэнергии и состоят из трех тиристорных шкафов, включающих в себя 12 силовых тиристорных блоков БСЕ1-ЗИТ8-18(20)-У3а, при этом в каждом тиристорном шкафу установлено по четыре тиристорных блока. Так как каждый тиристорный блок реализует одно тиристорное плечо (одну тиристорную фазу) из трех последовательно соединенных тиристоров при 12-пульсовой мостовой схеме преобразования электроэнергии, то в конструкции инвертора И-ПТЕТ-1,6к-4к-12(6)-У3а используется 36 тиристоров. Следует отметить, что для 12-пульсовой мостовой схемы инвертора И-ПТЕТ-1,6к-4к-12(6)-У3а подключается к преобразовательному трансформатору ТРДТП-20000/35ИУ1 с питающим первичным напряжением 35, 10,5 и 6,3 кВ, а для 6-пульсовой мостовой схемы — к преобразовательному трансформатору ТДП-12500/10ИУ1 с питающим первичным напряжением 10,5 и 6,3 кВ. За счет использования силовых тиристорных блоков БСЕ1-ЗИТ8-18(20)-У3а у инвертора И-ПТЕТ-1,6к-4к-12(6)-У3а реализовано естественное воздушное охлаждение тиристоров с использованием специальных охладителей на тепловых трубах 0172-626-У3 или Т341-017 [4, 7].

Чтобы обеспечить регулирование напряжения в контактной сети на высокоскоростном участке Москва — Санкт-Петербург Октябрьской железной дороги по заданию Департамента электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» разработаны и включены в работу 13 тяговых подстанций с одноступенчатой трансформацией 110/3,3 кВ. Для них научными сотрудниками ВНИИЖТ, УрГУПС, специалистами ОЗ «ВЭИ» и ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» с использованием тиристорных секций

на базе силовых тиристорных блоков БСЕ1-ЗИТ8-18(20)-У3а созданы, изготовлены и внедрены 26 мощных 12-пульсовых тиристорных ВИП и ВП с быстродействующим бесконтактным регулированием выходного напряжения постоянного тока и параллельным соединением тиристорных секций [4, 8, 9]. Такие тиристорные ВИП и ВП подключаются к специальным преобразовательным трансформаторам ТРДТП-20000/110ИУ1 и ТРДТП-16000/110ИУ1 с РПН ($\pm 9 \times 1,25 \%$), разработанным и выпускаемым ОАО «Уралэлектротяжмаш». Каждый мощный 12-пульсовый тиристорный ВИП с быстродействующим бесконтактным регулированием выходного напряжения включает в себя [4, 8, 9]:

12-пульсовый тиристорный выпрямитель В-ТПЕТ-1,6к-4к-12-У3 на номинальное напряжение 4000 В и номинальный ток 1600 А (в трех тиристорных шкафах);

12-пульсовый тиристорный регулятор, в качестве которого используется 12-пульсовый тиристорный выпрямитель В-ТПЕТ-3,15к-4к-12-У3 на номинальное напряжение 4000 В и номинальный ток 3150 А (в шести тиристорных шкафах);

12-пульсовый тиристорный инвертор И-ПТЕТ-1,6к-4к-12-У3 на номинальное напряжение 4000 В и номинальный ток 1600 А (в трех тиристорных шкафах).

Инвертор И-ПМП-1,6к-3,8к-50-УХЛ4 разработан специалистами ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» [10] на номинальное напряжение 3800 В и номинальный ток 1600 А. Максимальное напряжение, на которое рассчитан инвертор, составляет 4000 В. Допустимые импульсные перегрузки по току от номинального значения: в течение 15 мин один раз в 1 ч — 125 %; в течение 2 мин один раз в 1 ч — 150 %; в течение 10 с один раз в 2 мин — 200 %.

Силовые тиристорные секции выполнены с применением таблеточных тиристоров по 12-пульсовой (И-ПМП) и 6-пульсовой (И-ПТП) схемам преобразования электроэнергии и состоят из двух тиристорных шкафов, в каждом из которых расположено по три тиристорных блока (рис. 9).

Тиристорные блоки разработаны с применением мощных таблеточных тиристоров высокого класса Т273-1250-46 УХЛ2 на токи 1250 А (рис. 10). Каждый блок реализует либо одно тиристорное плечо (одну тиристорную фазу) из трех последовательно соединенных тиристоров при 6-пульсовой (И-ПТП), либо два тиристорных плеча (две тиристорных фазы) из двух последовательно соединенных тиристоров в каждом при 12-пульсовой (И-ПМП) мостовой схеме. Таким образом, в зависимости от схемы преобразования электроэнергии в конструкции инвертора применяется соответственно либо 18, либо 24 таблеточных тиристоров. У инвертора И-ПМП-1,6к-3,8к-50-УХЛ4 реализовано принудительное воздушное охлаждение тиристоров с применением специальных охладителей на тепловых трубах RZP-D 02А-115А [10].

Отметим, что для модернизации и разработки рассмотренных ВИП и ИП научные сотрудники УрГУПС выполнили комплексные теоретические и экспериментальные исследования, а также провели испытания оборудования в лабораторных и эксплуатационных условиях на действующих тяговых подстанциях постоянного тока [11–22]. На основе полученных результатов были разработаны и внедрены новые инновационные технические решения [4–6, 8, 9, 11, 12, 23–33].

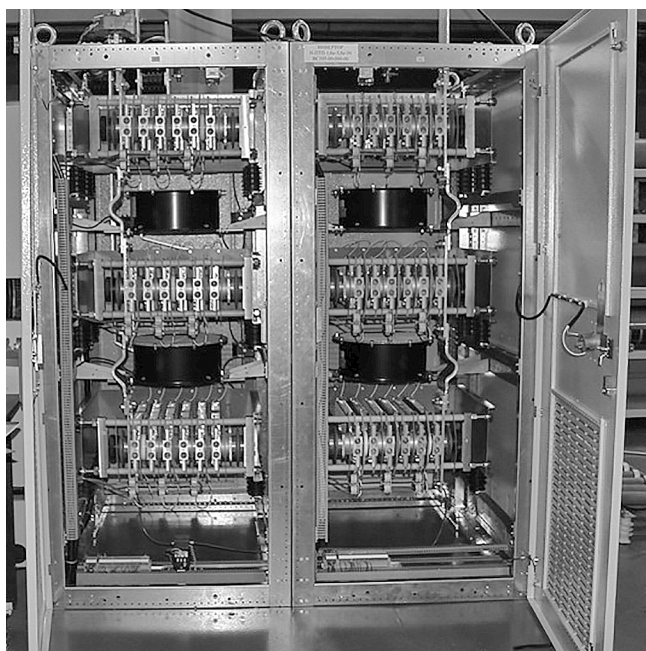


Рис. 9. Тиристорные шкафы инвертора И-ПМП-1,6к-3,8к-50-УХЛ4

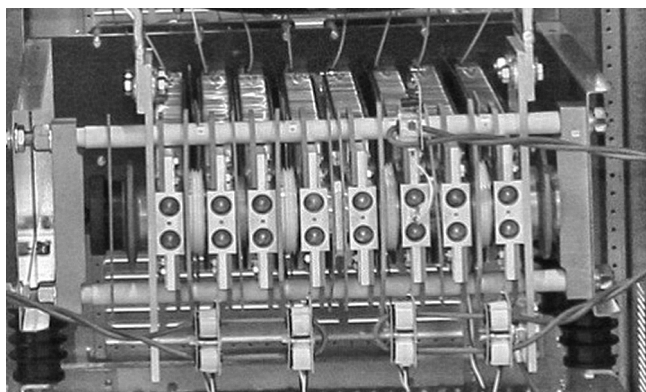


Рис. 10. Тиристорный блок инвертора И-ПМП-1,6к-3,8к-50-УХЛ4

При этом на тяговых подстанциях постоянного тока впервые серийно реализована 12-пульсовая мостовая схема инвертирования электрической энергии с последовательным соединением двух трехфазных мостов, которая применена в конструкции инвертора И-ПМП-2,4к-4к-3/12(6)-УЗ [4, 5, 12]. Также впервые разработаны и внедрены ВИП с регулированием напряжения управляемыми реакторами [11, 23], бесконтактным переключением режимов [11, 24, 25], оснащенные быстросрабатывающими устройствами защит превентивного типа

Сведения об авторах:

Юрий Павлович Неугодников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения

Иван Павлович Неугодников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения

[11, 26–29]. Для усиления участков железных дорог с высокоскоростным и тяжеловесным движением поездов разработаны и внедрены мощные 12-пульсовые тиристорные ВИП и ВП с быстродействующим бесконтактным тиристорным регулированием выходного напряжения при параллельном соединении тиристорных секций, выпрямителя, тиристорного регулятора и инвертора [4, 8, 9]. Для 6- и 12-пульсовых ВИП и ИП разработаны контроллеры управления, регулирования, диагностики и защиты, в том числе микропроцессорные, в которых реализованы новые технические решения с повышенными функциональными возможностями и надежностью работы [4, 5, 23–33]. Для 6- и 12-пульсовых ВИП, ИП и ВП также впервые разработаны аппаратура и системы диагностики, в том числе микропроцессорные, которые позволяют диагностировать тиристорные преобразователи в «холодном состоянии» (то есть до подачи напряжения на тиристорные секции) [31–33].

В процессе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что разработанные ВИП и ИП, выполненные по 12-пульсовым схемам преобразования электроэнергии, по сравнению с 6-пульсовыми позволяют [5, 12–22]:

- увеличить коэффициент мощности инвертора на 11–12 %;
- уменьшить коэффициент несинусоидальности напряжения (на шинах питающего напряжения 10 кВ) от токов инвертора в 1,7–1,8 раза;

- снизить эквивалентное мешающее напряжение на входе инвертора в 1,8–1,9 раза;

- уменьшить наклон входной характеристики инвертора в 1,9–2,4 раза;

- снизить аварийные токи опрокидывания инвертора в 2–2,6 раза.

По результатам исследований основных характеристик и энергетических показателей в нормальных, перегрузочных и аварийных режимах работы многопульсовых ВИП и ИП для тяговых подстанций [12–17, 20, 21] в качестве одного из направлений дальнейшего развития ВИП и ИП можно рекомендовать совершенствование и разработку новых типов многопульсовых инверторов путем перехода от 12- к 24-пульсовой мостовой схеме инвертирования электрической энергии с последовательным соединением трехфазных мостов.

Кроме того, анализ состояния и перспектив развития силовой электроники показывает [34–36], что основные направления совершенствования и разработки новых вариантов исполнения ВИП и ИП для тяговых подстанций в первую очередь связаны с использованием современных полупроводниковых приборов повышенной мощности (запираемых IGBT-тиристоров и модулей IGBT-транзисторов), которые имеют в том числе встроенные в полупроводниковую структуру элементы защиты при аварийных режимах работы.

Authors information:

Yuriy P. Neugodnikov, PhD in Engineering, Associate Professor of Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport

Ivan P. Neugodnikov, PhD in Engineering, Associate Professor of Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport

Литература

1. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года («Белая книга»). Москва : ОАО «РЖД», 2011. 340 с.
2. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 г. и на перспективу до 2030 г. : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 г. № 2537р. Москва, 2016. 76 с.
3. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций / С. Д. Соколов, Ю. М. Бей, Я. Д. Гуральник, О. Г. Чаусов. Москва : Транспорт, 1979. 264 с.
4. Неугодников Ю. П., Низов А. С., Штин А. Н. Инвертирование электрической энергии на электрифицированных железных дорогах. Ч. 2. Выпрямительно-инверторные преобразователи тяговых подстанций. Екатеринбург : УрГУПС, 2002. 84 с.
5. Двенадцатипульсовый выпрямительно-инверторный преобразователь для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог / В. П. Неугодников, Ю. П. Неугодников, Д. Ю. Бей, И. П. Неугодников // Актуальные проблемы безопасности на железнодорожном транспорте. Екатеринбург : УрГАПС, 1994. Вып. 1 (83). С. 142–150.
6. Инвертор типа И-ПТЕТ-0,8к-3,6к-1(2)-У3а. Технические условия ПИБМ 3.215.008 ТУ. Москва : ВЭИ, 2001. 36 с.
7. Паспорт ПИБМ 3.220.019 ПС на преобразователь тиристорный на базе блоков типа БСЕ1-3ИТ8-18-У3а. Москва : ВЭИ, 2001. 20 с.
8. Выпрямительный и выпрямительно-инверторный агрегаты с регулированием выходного напряжения для тяговых подстанций / В. В. Руденский, Т. П. Добровольский, В. А. Зимаков [и др.] // Новое в хозяйстве электроснабжения. Москва : Интекст, 2003. С. 107–111.
9. Неугодников Ю. П., Неугодников И. П. Выпрямительно-инверторные преобразователи с регулированием выходного напряжения для тяговых подстанций постоянного тока // Транспорт Урала. 2021. № 4 (71). С. 120–124. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-120-124.
10. Каталог 248-2013-01: Инверторы для системы тягового электроснабжения. Санкт-Петербург : «НИИЭФА-ЭНЕРГО», 2013. 21 с.
11. Неугодников Ю. П. Быстродействующие системы защиты и бесконтактного управления выпрямительно-инверторных агрегатов с регулированием напряжения электрических железных дорог : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Свердловск, 1983. 241 с.
12. Неугодников Ю. П., Неугодников В. П. Схемы 12- и 24-пульсовых выпрямительно-инверторных преобразователей тяговых подстанций // Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте. Екатеринбург : УрГАПС, 1995. Вып. 3 (85). С. 55–70.
13. Неугодников Ю. П. Внешние и ограничительные характеристики 12- и 24-пульсовых инверторных преобразователей тяговых подстанций // Транспорт Урала. 2006. № 1 (8). С. 28–37. ISSN 1815-9400.
14. Неугодников Ю. П., Неугодников А. Ю. Внешние характеристики и энергетические показатели 12- и 24-пульсовых преобразователей повышенного напряжения 6,6 и 13,2 кВ // Транспорт Урала. 2007. № 4 (15). С. 80–85. ISSN 1815-9400.
15. Неугодников Ю. П., Неугодников И. П. Анализ энергетической эффективности работы выпрямительно-инверторных преоб-

References

1. The strategy of the holding «RZD» for the period until 2030 (White Book). Moscow: JSC «RZD», 2011. 340 p. (In Russian).
2. The energy strategy of the holding Russian Railways for the period until 2020 and for the future until 2030 : approved by the Order of JSC Russian Railways dated 14.12.2016 No. 2537r. Moscow, 2016. 76 p. (In Russian).
3. Sokolov S. D., Bey Yu. M., Gural'nik Ya. D., Chausov O. G. Semiconductor converting devices of traction substations. Moscow : Transport, 1979. 264 p. (In Russian).
4. Neugodnikov Yu. P., Nizov A. S., Shtin A. N. Inversion of electric energy on electrified railways. Part 2. Rectifying and inverter transformers of traction substations. Ekaterinburg : USURT, 2002. 84 p. (In Russian).
5. Neugodnikov V. P., Neugodnikov Yu. P., Bey D. Yu., Neugodnikov I. P. Twelve-pulse rectifying and inverter transformer for traction substations of electrified railways. *Actual problems of security on railway transport*. Ekaterinburg : UrGAPS, 1994. Issue 1 (83). Pp. 142–150. (In Russian).
6. Inverter type I-PTET-0.8k-3.6k-1(2)-U3a. Technical specifications of PIBM 3.215.008 TU. Moscow : VEI, 2001. 36 p. (In Russian).
7. Passport PIB 3.220.019 PS for a thyristor converter based on blocks of type BSE1-3IT8-18-U3a. Moscow : VEI, 2001. 20 p. (In Russian).
8. Rudenskiy V. V., Dobrovolskiy T. P., Zimakov V. A. [et al.]. Rectifier and rectifier-inverter unit with output voltage regulation for traction substations. *New in the electricity supply sector*. Moscow : Intext, 2003. Pp. 107–111. (In Russian).
9. Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov I. P. Rectifying and inverter transformers with output voltage regulation for direct current traction substations. *Transport of the Urals* 2021. No. 4 (71). Pp. 120–124. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-120-124. (In Russian).
10. Catalogue 248-2013-01. Rectifiers for traction power supply system. St. Petersburg : NIIIEFA-ENERGO, 2013. 21 p. (In Russian).
11. Neugodnikov Yu. P. High-speed protection and contactless control systems for rectifier-inverter units with voltage regulation of electric railways : PhD in Engineering Thesis. Sverdlovsk, 1983. 241 p. (In Russian).
12. Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov V. P. Schemes of 12-pulse and 24-pulse rectifying and inverter transformers of traction substations. *Energy-saving technologies on railway transport*. Ekaterinburg : UrGAPS, 1995. Issue 3 (85). Pp. 55–70. (In Russian).
13. Neugodnikov Yu. P. External and limiting characteristics of 12-pulse and 24-pulse inverter transformers of traction substations. *Transport of the Urals*. 2006. No. 1 (8). Pp. 28–37. ISSN 1815-9400. (In Russian).
14. Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov A. Yu. External characteristics and energy indicators of 12-pulse and 24-pulse increased-voltage transformers of 6.6 and 13.2 kV. *Transport of the Urals*. 2007. No. 4 (15). Pp. 80–85. ISSN 1815-9400. (In Russian).
15. Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov I. P., Energy efficiency analysis of operation of rectifying and inverter transformers for direct current traction substations. *Transport of the Urals*. 2021. No. 3 (70). Pp. 104–108. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-104-108. (In Russian).

- разователей тяговых подстанций постоянного тока // Транспорт Урала. 2021. № 3 (70). С. 104–108. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-104-108.
16. Неугодников Ю. П., Неугодников И. П. Оценка энергетических показателей 12- и 24-пульсовых выпрямительно-инверторных преобразователей тяговых подстанций // Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте. Екатеринбург : УрГАПС, 1995. Вып. 3 (85). С. 71–82.
 17. Неугодников Ю. П., Неугодников А. Ю. Энергетические показатели 12- и 24-пульсовых инверторов и управляемых выпрямителей тяговых подстанций // Разработка и совершенствование электрооборудования для систем тягового электроснабжения железных дорог. Екатеринбург : УрГУПС, 2009. Вып. 70 (153). С. 66–78.
 18. Неугодников И. П., Соколов С. Д. Аварийные режимы двенадцатифазного инвертора тяговой подстанции // Вестник ВНИИЖТ. 1988. № 6. С. 19–22. ISSN 2223-9731.
 19. Неугодников И. П. Токи циркуляции в двенадцатифазных схемах непереклюкаемых выпрямительно-инверторных преобразователей // Вестник ВНИИЖТ. 1987. № 8. С. 21–25. ISSN 2223-9731.
 20. Неугодников Ю. П., Неугодников И. П. Оценка предельных токов 24-пульсовых инверторных преобразователей тяговых подстанций // Наука и транспорт сегодня: проблемы и решения. Екатеринбург : УрГАПС, 1996. Вып. 5 (87). Ч. 1. С. 52–58.
 21. Неугодников Ю. П. Аварийные режимы многопульсовых инверторных преобразователей тяговых подстанций // Повышение надежности работы устройств электроснабжения железных дорог. Екатеринбург : УрГУПС, 2000. Вып. 13 (95). С. 121–131.
 22. Анализ технического состояния, режима работы и эффективности использования выпрямительно-инверторных агрегатов (2.026.Р) : отчет о НИР / УрГУПС ; рук. Неугодников Ю. П. Екатеринбург, 2012. 127 с.
 23. Устройство автоматического регулирования напряжения для выпрямительно-инверторных преобразователей тяговых подстанций / В. М. Арутюнов, Ю. М. Бей, В. Г. Зимовец [и др.] : а.с. № 1108603 СССР; опубл. 15.08.1984, Бюл. № 30.
 24. Устройство для раздельного управления выпрямительно-инверторным преобразователем тяговых подстанций / Ю. М. Бей, Ю. П. Неугодников, В. П. Неугодников [и др.] : а.с. № 913554 СССР; опубл. 15.03.1982, Бюл. № 10.
 25. Устройство для раздельного управления реверсивным преобразователем / Ю. М. Бей, В. П. Неугодников, Ю. П. Неугодников [и др.] : а.с. № 1029380 СССР; опубл. 15.07.1983, Бюл. № 26.
 26. Способ и устройство защиты инвертора от срыва коммутации при совместной работе с выпрямителем / Ю. М. Бей, Ю. П. Неугодников, В. П. Неугодников [и др.] : а.с. № 955338 СССР; опубл. 30.08.1982, Бюл. № 32.
 27. Устройство защиты мостового инвертора при исчезновении импульсов управления и нарушении проводимости тиристоров / Ю. М. Бей, Ю. П. Неугодников, В. П. Неугодников [и др.] : а.с. № 1001299 СССР; опубл. 28.02.1983, Бюл. № 8.
 28. Устройство для защиты мостового инвертора от опрокидываний при совместной работе с выпрямителем / Ю. М. Бей, В. П. Неугодников, Ю. П. Неугодников, В. М. Арутюнов : а.с. № 1069060 СССР; опубл. 23.01.1984, Бюл. № 3.
 16. Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov I. P. Assessment of energy indicators of 12-pulse and 24-pulse rectifying and inverter transformers for traction substations. *Energy-saving technologies on railway transport*. Ekaterinburg : UrGAPS, 1995. Issue 3 (85). Pp. 71–82. (In Russian).
 17. Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov A. Yu. Energy indicators of 12-pulse and 24-pulse inverters and controlled rectifiers of traction substations. *Development and improvement of electric equipment for railway power supply system*. Ekaterinburg : USURT, 2009. Issue 70 (153). Pp. 66–78. (In Russian).
 18. Neugodnikov I. P., Sokolov S. D. Emergency states of 12-phase inverter of traction substations. *VNIIZhT Scientific Journal*. 1988. No. 6. Pp. 19–22. ISSN 2223-9731. (In Russian).
 19. Neugodnikov I. P. Circulation currents in 12-phase schemes of non-switchable rectifying and inverter transformers. *VNIIZhT Scientific Journal*. 1987. No. 8. Pp. 21–25. ISSN 2223-9731. (In Russian).
 20. Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov I. P. Assessment of limiting currents for 24-pulse inverter transformers of traction substations. *Science and transport today: problems and solutions*. Ekaterinburg : UrGAPS, 1996. Issue 5 (87). Part 1. Pp. 52–58. (In Russian).
 21. Neugodnikov Yu. P. Emergency states of multi-pulse inverter transformers for traction substations. *Increase of operation reliability of railway power supply system equipment*. Ekaterinburg : USURT, 2000. Issue 13 (95). Pp. 121–131. (In Russian).
 22. Analysis of the technical condition, operating mode and efficiency of rectifier-inverter units (2.026.R) : report on research work. USURT ; executive Neugodnikov Yu. P. Ekaterinburg, 2012. 127 p. (In Russian).
 23. Arutyunov V. M., Bey Yu. M., Zimovets V. G. [et al.]. Automatic voltage regulation device for rectifier-inverter converters of traction substations electric railways : author's certificate No. 1108603 USSR; publ. 15.08.1984, Bulletin No. 30. (In Russian).
 24. Bey Yu. M., Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov V. P. [et al.]. Device for separate control of rectifier-inverter converter of traction substations : author's certificate No. 913554 USSR; publ. 15.03.1982, Bulletin No. 10. (In Russian).
 25. Bey Yu. M., Neugodnikov V. P., Neugodnikov Yu. P. [et al.]. Device for separate control of a reversible converter : author's certificate No. 1029380 USSR; publ. 15.07.1983, Bulletin No. 26.
 26. Bey Yu. M., Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov V. P. [et al.]. Method and device for protecting the inverter from switching failure when working with a rectifier : author's certificate No. 955338 USSR; publ. 30.08.1982, Bulletin No. 32. (In Russian).
 27. Bey Yu. M., Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov V. P. [et al.]. Protection device for the bridge inverter in case of disappearance of control pulses and violation of the conductivity of thyristors : author's certificate No. 1001299 USSR; publ. 28.02.1983, Bulletin No. 8. (In Russian).
 28. Bey Yu. M., Neugodnikov V. P., Neugodnikov Yu. P., Arutyunov V. M. Device for protecting the bridge inverter from overturning when working with a rectifier : author's certificate No. 1069060 USSR; publ. 23.01.1984, Bulletin No. 3. (In Russian).
 29. Bey Yu. M., Neugodnikov V. P., Neugodnikov Yu. P., Zimovets V. G. Device for protecting a thyristor inverter in case of a violation of the conductivity of thyristors : author's certificate No. 1267530 USSR; publ. 30.10.1986, Bulletin No. 40. (In Russian).

29. Устройство для защиты тиристорного инвертора при нарушении проводимости тиристоров / Ю. М. Бей, В. П. Неугольников, Ю. П. Неугольников, В. Г. Зимовец : а.с. № 1267530 СССР; опубл. 30.10.1986, Бюл. № 40.
30. Устройство защиты контактной сети постоянного тока от коротких замыканий / Ю. М. Бей, В. Г. Зимовец, И. П. Неугольников, Ю. П. Неугольников: а.с. № 1428619 СССР; опубл. 07.10.1988, Бюл. № 37.
31. Высоковольтный блок с устройством контроля / И. П. Неугольников : пат. 2191456 Российская Федерация. № 2001111978/09; заявл. 03.05.2001; опубл. 20.10.2002, Бюл. № 29.
32. Высоковольтный блок с устройством контроля / И. П. Неугольников : пат. 2251776 Российская Федерация. № 2003129306/09; заявл. 01.10.2003; опубл. 10.05.2005, Бюл. № 13.
33. Неугольников Ю. П., Неугольников И. П. Анализ методов и устройств диагностики и защиты полупроводниковых преобразователей тяговых подстанций железных дорог // Транспорт Урала. 2022. № 2 (73). С. 111–117. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-111-117.
34. Флоренцев С. Н. Состояние и перспективы развития приборов силовой электроники на рубеже столетий // Электротехника. 1999. № 4. С. 2–9. ISSN 0013–5860.
35. Флоренцев С. Н. Силовые IGBT-модули — основа современного преобразовательного оборудования // Электронные компоненты. 2002. № 6. С. 11–17.
36. Новые высоковольтные мощные тиристоры со встроенными в полупроводниковую структуру элементами защиты в аварийных режимах / П. Г. Дерменжи, Ю. М. Локтаев, А. М. Сурма, А. А. Черников // Силовая электроника. 2012. № 1. С. 14–15.
30. Bey Yu. M., Zimovets V. G., Neugodnikov I. P., Neugodnikov Yu. P. Device for protecting the DC contact network from short circuits: author's certificate No. 1428619 USSR; publ. 07.10.1988, Bulletin No. 37. (In Russian).
31. Neugodnikov I. P. High voltage unit with monitoring device : patent 2191456 Russian Federation. No. 2001111978/09; filed 03.05.2001; publ. 20.10.2002, Bulletin No. 29. (In Russian).
32. Neugodnikov I. P. High voltage unit with monitoring device : patent 2251776 Russian Federation. No. 2003129306/09; filed 01.10.2003; publ. 10.05.2005, Bulletin No. 13. (In Russian).
33. Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov I. P. Analysis of methods and equipment for diagnostics and protection of semi-conductor converters of railway traction substations. *Transport of the Urals*. 2022. No. 2 (73). Pp. 111–117. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-111-117. (In Russian).
34. Florentsev S. N. Condition and perspectives of development of power electronic devices at the turn of the century. *Russian Electrical Engineering*. 1999. No. 4. Pp. 2–9. ISSN 0013-5860. (In Russian).
35. Florentsev S. N. Power IGBT-modules is the basis of modern converting equipment. *Electronic components*. 2002. No. 6. Pp. 11–17. (In Russian).
36. Dermenzhi P. G., Loktaev Yu. M., Surma A. M., Chernikov A. A. New high-voltage powerful thyristors with built into semi-conductor structure elements for protection in emergency states. *Power electronics*. 2012. No. 1. Pp. 14–15. (In Russian).

Объем статьи 1,15 авторских листа

Подписка на 2024 год.

Периодичность — 4 номера в год.

ф. СП-1

✂

АБОНЕМЕНТ

на ~~газету~~
журнал

46463

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Количество комплектов:

на 2024 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
						X	X	X	X	X	X

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

на ~~газету~~
журнал

46463

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Стоимость	подписки	руб. ____ коп.	Количество комплектов:	
	переадресовки	руб. ____ коп.		

на 2024 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
						X	X	X	X	X	X

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

Уважаемые читатели и авторы журнала «Транспорт Урала»!

Если вам нравится наш журнал, вы можете оказать содействие в его развитии, перечислив денежные средства по реквизитам:

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС

ИНН-КПП 6670317893/667001001

ОГРН 1156600001470

620075, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Шевченко, д. 20, помещение 1

Р/с 40703810863010000192

в ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ

к/с 30101810900000000795

БИК 046577795

Назначение платежа: «Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС».

Ваша финансовая поддержка позволит нам увеличить число публикаций, повысить индексы цитирования журнала и наших авторов.

Уважаемые руководители инновационных компаний и предприятий!

Предлагаем вам услуги по продвижению вашей продукции через сеть Ассоциации выпускников УЭМИИТ-УрГУПС.

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС — это кооперация большого числа неравнодушных людей различных сфер деятельности, окончивших наш университет.

Кроме того, предлагаем услуги по подбору молодых специалистов, по организации поиска решений прикладных и научных задач в рамках диссертационных работ, выполняемых в УрГУПС.

Всю необходимую информацию вы можете получить по тел. (343) 221-24-67 или на сайте <http://www.usurt.ru/vypusknikam/assotsiatsiya-vypusnikov-urgups>

Извещение	<p>Получатель: Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС КПП: 667001001 ИНН: 6670317893 ОКТМО: 65701000 Р/сч.: 40703810863010000192 в: ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ БИК: 046577795 К/сч.: 30101810900000000795 Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2024 г.</p>
Квитанция	<p>Получатель: Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС КПП: 667001001 ИНН: 6670317893 ОКТМО: 65701000 Р/сч.: 40703810863010000192 в: ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ БИК: 046577795 К/сч.: 30101810900000000795 Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2024 г.</p>

Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

DOI:10.20291/1815-9400

№ 2 (81), 2024 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 4 раза в год

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Пресса России» — 46463

Издание зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18098

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.

Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Адрес учредителя и издателя:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Тел. (343) 221-23-90

<http://www.usurt.ru/transporturala>

e-mail: EPupova@usurt.ru

Главный редактор:

Александр Геннадьевич Галкин

Научный редактор:

Александр Эрнстович Александров

Выпускающий редактор:

Елена Семеновна Пупова,

тел. (343) 221-23-90, 8-912-61-07-229,

e-mail: EPupova@usurt.ru

Верстка и дизайн:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Илья Ефимович Рабинович

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 28.06.2024

Выход в свет 17.07.2024

Тираж 250 экз. (1-й з-д 1–60)

Формат 60×90/8

Цена 663,76 руб.

Изготовлено в ИБК УрГУПС,

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Заказ № 37

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2024

