

**МУЛЬТИКРИТЕРИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ  
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ  
НА ТРАНСПОРТЕ И В ЛОГИСТИКЕ**

**СТРУКТУРНО-ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ  
МЕТАЛЛОВ ДЛЯ ВАГОНОСТРОЕНИЯ**

**НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ  
ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ  
НА СОРТИРОВОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ  
НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА  
И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
МЕТОДА РЕГУЛИРОВКИ  
ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ДИЗЕЛЯ  
ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ  
ИНДИКАТОРНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ**

**ОЦЕНКА БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ**

**ОБОСНОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ МОЩНОСТИ  
ЭЛЕКТРОВОЗА ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ  
ТЯГОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ В НЕПОЛНОФАЗНЫЙ РЕЖИМ**



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

1. Александр Галкин, д-р техн. наук, профессор, главный редактор журнала «Транспорт Урала», Екатеринбург, Россия
2. Александр Сладковски, д-р техн. наук, профессор, Силезский технический университет, Польша
3. Эдуард Горкунов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, Екатеринбург, Россия
4. Аксель Шмидер, д-р, «Сименс АГ», отраслевой сектор, департамент транспорта «Железнодорожное строительство», Эрланген, Германия
5. Эрки Хамалайнен, д-р экон. наук, университет Аалто, Школа экономики, Финляндия

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

1. Александров Александр Эрнстович, д-р техн. наук, доцент, научный редактор, Екатеринбург
2. Булаев Владимир Григорьевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
3. Галиев Ильхам Исламович, д-р техн. наук, профессор, Омск
4. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
5. Комаров Константин Леонидович, д-р техн. наук, профессор, Новосибирск
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. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с.н.с., Екатеринбург
10. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
11. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
12. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
13. Шароглазов Борис Александрович, д-р техн. наук, профессор, Челябинск

**INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD**

1. Alexander Galkin, DSc, professor, editor-in-chief of the journal «Transport of the Urals», Ekaterinburg, Russia
2. Alexander Sladkowski, professor, Silesian University of Technology, Poland
3. Eduard Gorkunov, DSc, professor, academician of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia
4. Axel Schmieder, DSc, Siemens AG, Industry Sector, Mobility Division, Transportation Engineering, Erlangen, Germany
5. Erkki Hamalainen, DSc, Aalto University School of Economics, Finland

**EDITORIAL BOARD**

1. Alexandrov Alexander Ernstovich, DSc, associate professor, science editor, Ekaterinburg
2. Bulaev Vladimir Grigorievich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Kozlov Petr Alexeyevich, DSc, professor, Moscow
5. Komarov Konstantin Leonidovich, DSc, professor, Novosibirsk
6. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
7. Larin Oleg Nikolayevich, DSc, professor, Moscow
8. Ledyayev Alexander Petrovich, DSc, professor, Saint-Petersburg
9. Rumyantsev Sergey Alexeyevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
10. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
11. Smolyaninov Alexander Vasiliyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
12. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
13. Sharoglazov Boris Alexandrovich, DSc in Engineering, professor, Chelyabinsk

<b>ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА</b>	<b>GENERAL TRANSPORT PROBLEMS</b>
Н. А. Осинцев. Мультикритериальные методы принятия решений на транспорте и в логистике ..... 3	N. A. Osintsev. Multi-criteria decision-making in transport and logistics ..... 3
<b>ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО</b>	<b>RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT</b>
А. В. Якушев, А. В. Смолянинов, К. М. Колясов. Структурно-феноменологические модели металлов для вагоностроения ..... 18	A. V. Yakushev, A. V. Smolyaninov, K. M. Kolyasov. Structural and phenomenological models of metals for car manufacturing ..... 18
Р. С. Большаков, А. П. Хоменко, [С. В. Елисеев]. Новые подходы к оценке состояния грузовых вагонов при движении на сортировочных устройствах на основе системного анализа и математического моделирования ..... 24	R. S. Bolshakov, A. P. Khomenko, [S. V. Eliseev]. New approaches of condition estimation of freight railway carriages at motion on sorting devices on base system analysis and mathematical modeling ..... 24
В. Б. Свердлов, В. Ф. Лапшин. Обеспечение сохранности вагонного парка на путях необщего пользования ..... 33	V. B. Sverdlov, V. F. Lapshin. Car fleet safety assurance on non-public railway tracks ..... 33
П. С. Григорьев, С. В. Беспалько, С. Н. Коржин, Ш. Р. Ибодуллоев. Оценка устойчивости цилиндрической оболочки котла цистерны с учетом заполнения ее жидким грузом ..... 40	P. S. Grigoryev, S. V. Bespalko, S. N. Korzhin, Sh. R. Ibodulloev. Assessment of stability for cylindrical part of tank shell with the consideration for its filling with liquid freight ..... 40
<b>ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ</b>	<b>CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION</b>
Е. Н. Тимухина, А. А. Гордиенко, В. В. Лесных, К. Э. Хамидуллина. О повышении надежности способов размещения и крепления грузов в вагонах ..... 46	E. N. Timukhina, A. A. Gordienko, V. V. Lesnykh, K. E. Khamidullina. On increase of reliability of methods for positioning and strapping of freight in cars ..... 46
Т. Е. Ли, Р. Г. Король. Обоснование этапности развития транспортного узла Пусан (Республика Корея) в условиях роста объема перевозок ..... 52	T. Y. Lee, R. G. Korol. Justification of the stages of development of the Busan transport hub (Republic of Korea) in the context of an increase in the volume of traffic ..... 52
А. В. Мартыненко, К. К. Ваколюк. Прогнозирование пассажиропотоков в пригородном железнодорожном сообщении на основе социально-экономических показателей и структуры землепользования (на примере Челябинской области) ..... 58	A. V. Martynenko, K. K. Vakolyuk. Forecasting of passenger traffic in commuter rail operation on the basis of social and economic indicators and structure of land use (on example of Chelyabinsk region) ..... 58
<b>ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА</b>	<b>ROLLING STOCK AND TRACTION</b>
А. Ю. Коньков, А. И. Трунов. Экспериментальное исследование метода регулировки топливной аппаратуры дизеля по характеристикам индикаторного тепловыделения ..... 66	A. Yu. Konkov, A. I. Trunov. Experimental study of the method for adjusting the fuel system of a diesel engine using the net heat release charts ..... 66
А. П. Буйносов, Д. Л. Худояров, И. А. Тюшев. Разработка алгоритма диагностики тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 «Синара» ..... 74	A. P. Buynosov, D. L. Khudoarov, I. A. Tyushev. Development of diagnostics algorithm for electric traction motors of 2ES6 «Sinara» electric locomotives ..... 74
<b>ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО</b>	<b>RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK</b>
Ю. С. Меркурев. Определение оптимальных параметров демпфирования земляного полотна железных дорог в сейсмически активных районах ..... 80	Yu. S. Merkurev. Determination of optimal parameters of railway roadbed damping in seismically active regions ..... 80
<b>АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ</b>	<b>MOTOR TRANSPORT</b>
Т. И. Кривцова, С. Н. Кривцов. Изменение смазывающих свойств автомобильных моторных масел в течение межсервисного пробега ..... 84	T. I. Krivtsova, S. N. Krivtsov. Change of lubricating properties of automobile motor oils during service interval mileage ..... 84
Ю. В. Баженов, М. Ю. Баженов, В. П. Каленов. Оценка безотказности электронной системы управления двигателем ..... 90	Yu. V. Bazhenov, M. Yu. Bazhenov, V. P. Kalenov. Assessment of reliability of electronic engine control system ..... 90
Д. Е. Болтнев, И. А. Высоцкая, А. В. Скрыпников, А. Н. Брюховецкий, П. В. Тихомиров. Проектирование продольного профиля лесовозной автомобильной дороги на подъемах ..... 96	D. E. Boltnev, I. A. Vysotskaya, A. V. Skrypnikov, A. N. Bryukhovetskiy, P. V. Tikhomirov. Designing of a longitudinal profile of a forest automobile road on increases ..... 96
<b>ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ</b>	<b>ELECTRIC SUPPLY</b>
Б. А. Аржаников, А. П. Сухогузов, А. Н. Штин, Т. С. Тарасовский. Обоснование снижения мощности электровоза трехфазной системы электрической тяги при переходе тягового выпрямителя в неполнофазный режим ..... 100	B. A. Arzhannikov, A. P. Sukhoguzov, A. N. Shtin, T. S. Tarasovskiy. Justification of power decrease of electric locomotive at three-phase system of electric traction when traction rectifier switches to open-phase mode ..... 100
Н. А. Афанасьева, И. А. Баева, Т. С. Тарасовский. Экономическая эффективность бесконтактного автоматического регулирования напряжения тиристорно-реакторным переключающим устройством в системе тягового электроснабжения постоянного тока ..... 107	N. A. Afanasyeva, I. A. Baeva, T. S. Tarasovskiy. Economic efficiency of contactless automatic voltage regulation by thyristor-reactor switching device in direct current traction power supply system ..... 107
С. И. Макашева, П. С. Пинчуков. Разработка программы «ХРОМАТИК» для оценки состояния тяговых трансформаторов ..... 114	S. I. Makasheva, P. S. Pinchukov. Development of «CHROMATIC» program for assessment of condition of traction transformers ..... 114
Ю. П. Неугодников, И. П. Неугодников. Выпрямительно-инверторные преобразователи с регулированием выходного напряжения для тяговых подстанций постоянного тока ..... 120	Yu. P. Neugodnikov, I. P. Neugodnikov. Rectifying and inverter transformers with output voltage regulation for direct current traction substations ..... 120

656.07:[005.2+004.89]

Никита Анатольевич Осинцев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова (МГТУ), Магнитогорск, Россия

## МУЛЬТИКРИТЕРИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ТРАНСПОРТЕ И В ЛОГИСТИКЕ

Nikita Anatolyevich Osintsev, PhD in Engineering, Associate Professor, Logistics and Transportation Systems Management Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU), Magnitogorsk, Russia

### Multi-criteria decision-making in transport and logistics

#### Аннотация

В последнее десятилетие на транспорте и в логистике активно развивается научное и практическое направление по разработке и совершенствованию методов мультикритериального принятия управлеченческих решений — MCDM. В статье дан обзор исследований в области применения MCDM, показаны особенности и различные подходы к классификации MCDM, практика их использования на транспорте и в логистической деятельности, предложен подход к систематизации методов. Представлена MCDM-модель и расчетный пример ранжирования управлеченческих решений по совершенствованию транспортно-логистической деятельности на предприятии с применением 11 методов MCDM. Для определения веса критерииев использован метод полной согласованности FUCOM. Ранжирование управлеченческих решений выполнено путем сравнения десяти методов: SAW, TOPSIS, PROMETHEE, COPRAS, MOORA, WASPAS, MAIRCA, EDAS, MABAC и MARCOS.

**Ключевые слова:** мультикритериальные методы принятия решений, MCDM, логистика, транспорт.

#### Summary

In the last decade, in transport and logistics, the scientific and practical direction for the development and improvement of methods for multi-criteria decision-making (MCDM) has been actively developing. The paper provides an overview of research in the field of using MCDM, shows the features and different approaches to the classification of MCDM, the practice of their use in transport and in logistics activities, an approach to systematizing the methods is proposed. An MCDM model and a calculated example of ranking management decisions to improve transport and logistics activities at an enterprise using 11 MCDM methods are presented. The FUCOM method is used to determine the weight of the criteria. The ranking of management decisions is performed by comparing 10 methods: SAW, TOPSIS, PROMETHEE, COPRAS, MOORA, WASPAS, MAIRCA, EDAS, MABAC and MARCOS.

**Keywords:** multiple-criteria decision-making, MCDM, logistics, transport.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-3-17

#### ВВЕДЕНИЕ

Принятие решений представляет собой неотъемлемую часть управления цепями поставок и ее ключевым элементом — транспортной системой. Эти решения включают учет различных экономических, экологических, технических, технологических и социальных вопросов, связанных с продвижением и переработкой логистических потоков [1]. Эффективность управления цепями поставок осложнена следующими основными проблемами [2–5]:

необходимостью учета интересов множества сторон — участников цепи поставок (грузовладельцев, перевозчиков, владельцев инфраструктуры и др.), а также государства и общества [2, 3];

наличием у стейкхолдеров (заинтересованных сторон) множества целей различной важности и сложности, связанных с принятием решений [2, 5];

неопределенностью и динамичностью логистической среды, а также множеством экономических, экологических, технических, технологических и социальных индикаторов оценки логистической и транспортной деятельности [2, 5];

широким разнообразием управлеченческих решений на разных уровнях управления [4, 5].

Поскольку принятие решений в сфере транспорта и логистики включает рассмотрение множества противоположных целей, критерииев оценки и принимаемых решений, актуальным является использование научных и эмпирических методов, которые обеспечивают поиск оптимальных управлеченческих решений из этого множества и учитывают многомерность окружающего мира. Такие методы принято называть многокритериальными методами принятия решений (multi-criteria decision making — MCDM), многокритериальным анализом принятия решений (multi-criteria decision analysis — MCDA) или просто многокритериальным анализом (multi-criteria analysis — MCA) [6].

MCDM используются для решения четырех типов проблем [7]. Это выбор наилучшей альтернативы из множества; ранжирование и сортировка альтернатив; описание и систематизация решений и их последствий; оценка и дальнейшее управление. Основная цель MCDM, по мнению В. Белтона [8], состоит в том, чтобы облегчить процесс принятия решения с учетом ценностей и целей всех заинтересованных сторон в контексте решаемой проблемы.

Это достигается в три ключевых этапа [8]: выявление и структурирование проблемы; построение и использование моделей; разработка планов действий. Наличие большого количества методов MCDM делает их выбор, использование, разработку и совершенствование актуальной научно-практической задачей для лиц, принимающих решения (ЛПР).

Цель настоящей статьи — краткий анализ использования MCDM на транспорте и в логистической деятельности. Структура статьи включает литературный обзор особенностей применения мультикритериальных методов, подходы к классификации и практике использования MCDM, а также расчетный пример сравнения различных методов MCDM при оценке управлеченческих решений по совершенствованию транспортно-логистической деятельности на предприятии.

## ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В последние десятилетия наблюдается рост числа публикаций, посвященных применению MCDM в различных сферах — строительстве, энергетике, управлении цепями поставок, логистической деятельности, на транспорте [9]. Активно используются MCDM в областях, смежных с транспортной деятельностью, таких как устойчивое развитие [10], автомобилестроение [11], управление цепями поставок [12] и зелеными цепями поставок [13, 14], зеленая [15] и реверсивная [16] логистика, энергопотребление [17], экономика [18] и корпоративная устойчивость [19]. В работе [20], посвященной анализу исследований устойчивого развития транспортных систем в период 2000–2019 гг., публикации по разработке индикаторов устойчивого транспорта и использованию многокритериального анализа и нелинейного моделирования оказались наиболее востребованными тематиками с высокими показателями цитируемости.

В работах [21, 22] отмечается, что опыт эффективного применения MCDM в конкретной области не может быть однаково использован при принятии решений во всех областях. Ни один из множества MCDM не может считаться универсальным, подходящим для всех ситуаций принятия решений [18, 23, 24]. Это связано, как правило, с характером и объ-

емом данных для анализа, различием компетенции участников процесса анализа, параметрами процесса оценки (продолжительностью, сложностью), разнообразием принимаемых решений и другими ограничениями [24]. Как следствие, возникает проблема выбора наиболее эффективного метода MCDM. Рекомендации по такому выбору даны в исследованиях [23, 25].

В научной литературе MCDM разделены на две области: многоцелевое принятие решений (Multi-Objective Decision Making — MODM) [26] и принятие решений по множеству атрибутов (Multi-Attribute Decision Making — MADM) [27]. Основное различие между ними состоит в том, что первое концентрируется на непрерывных пространствах решений (т.е. когда количество альтернатив бесконечно), а второе — на дискретных (т.е. когда количество альтернатив относительно мало). Другими словами, методы MODM связаны с проблемами, в которых альтернативы не предопределены, а цель рассматриваемой проблемы состоит в том, чтобы найти лучшую (оптимальную) альтернативу с учетом набора четко определенных ограничений и поддающихся количественной оценке нескольких целей. Методы MADM в основном применяются для ранжирования, когда конечное число предложенных альтернатив оценивается по отношению к различным взвешенным атрибутам для получения рейтинга предпочтений, который описывает эффективность каждой альтернативы для достиже-

ния цели в отношении атрибутов. Сравнительная характеристика MODM и MADM приведена в табл. 1 [27–29].

Развитие MCDM осуществляется по трем направлениям [22]: формальные модели (алгоритмы, методики и парадигмы выбора), теория оценки (гипотезы о ценностях и предпочтениях) и методология оценки (выявление, оценка и масштабирование индивидуальных предпочтений, полезностей и субъективных вероятностей в различных ситуациях MCDM).

Некоторые исследования направлены на отдельные элементы процесса принятия решений в MCDM. Например, по мнению авторов работы [30], решение проблем, связанных с выбором и ранжированием в MCDM, достаточно изучено. В своих исследованиях они рассматривают проблемы сортировки в MCDM, систематизируя научные работы за 30-летний период. Работа [31] посвящена особенностям различных методов нормализации, которые могут использоваться в задачах MCDM. В исследовании [32] представлены результаты анализа чувствительности принятия решений на основе ранговых методов MCDM. В [33] рассмотрен метод многокритериального анализа с участием нескольких субъектов (Multi actor multi criteria analysis method — MAMCA), который позволяет при принятии решений учитывать интересы всех участников. Исследование [34] посвящено использованию робастных методов при принятии решений: авторы сравнивают четыре робастных метода — Robust Decision

Таблица 1

### Сравнение MADM и MODM

Сравниваемый признак	MADM	MODM
Основное назначение	Ранжирование	Оптимизация
Парадигма моделирования решений	Ориентация на результат	Ориентация на процесс
Характер принятия решений	Дискретный	Непрерывный
Взаимодействие с лицом, принимающим решение	Низкое	Высокое
Ограничения	Нечеткие	Четкие
Основа определения критериев	Альтернативы	Цели
Цели	Неявные	Конкретные
Атрибуты	Понятные	Неявные
Альтернативы	Предопределены	Не предопределены
Количество альтернатив	Малое (конечное)	Большое (бесконечное)

Making, Many-Objective Robust Decision Making (MORDM), Multi-scenario MORDM и Many-Objective Robust Optimization (MORO).

Критический взгляд на использование MCDM можно сгруппировать по следующим проблемам [18, 35].

1. Алгоритмы агрегирования. Применение для одной многоцелевой задачи различных методов MCDM дает разные результаты. Следовательно, выбор подходящего метода MCDM из множества — сложная задача, влияющая на окончательный результат процесса принятия решения.

2. Сбор информации, ее возможная потеря. Способы получения субъективной информации (вес, пороговые значения) нетривиален и может повлиять на результаты. Потеря ценной информации возможна при поиске компромисса между критериями (компенсирующие методы), наличии несравнимых вариантов и необходимости приведения к одному абстрактному значению в процессе агрегирования данных, а также при эффекте масштабирования данных.

3. Структурирование проблемы. Результатами можно манипулировать путем исключения или добавления дополнительных критериев либо альтернатив, влияющих на решение. К тому же в зависимости от того, сколько дополнительной информации требуется для различных методов MCDM, возможно возникновение эффекта «черного ящика», что ставит под угрозу способность ЛПР четко следить за процессом принятия решения и оценивать результаты.

4. Неопределенность. Результаты часто представлены с двумя десятичными знаками, что дает ложное ощущение точности, учитывая неопределенность в используемых входных данных и распространение ошибок в модели. Неопределенность также присуща процессу принятия решений, поскольку трудно количественно оценить и представить эффективность большинства вариантов с помощью одного значения.

5. Трудоемкость процесса. Многосторонний характер решаемых задач требует значительных затрат времени ЛПР и ресурсов на протяжении всего процесса принятия решения.

Несмотря на перечисленные недостатки, использование MCDM [35] обеспечивает системный, научный, объективный подход в принятии решений, учитывающий множество факторов окружающего мира. Литературные обзоры [4, 9, 36, 37] показывают значительно выросшее за последние годы число публикаций по использованию методов MCDM в области транспортных систем и позволяют прогнозировать, что в будущем это количество будет увеличиваться.

## СИСТЕМАТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ MCDM

Множество используемых в настоящее время методов MCDM требует систематизации и классификации для повышения эффективности и надежности их применения. Различные подходы к классификации MCDM рассмотрены в работах [18, 28, 35, 38–44]. Базовым считается подход, предложенный Ч.-Л. Хван и К. Юн [27], в котором MCDM разделены на две группы: непрерывные MODM (с бесконечным числом альтернатив) и дискретные MADM (ограниченное число альтернатив). Основной признак группировки — тип информации от лица, принимающего решение: информация об атрибутах, альтернативах или отсутствие информации. Э. К. Завадская и З. Турскис [18] рас-

ширили группировку, добавив в классификацию современные методы MCDM.

К. Карлссон и Р. Фуллер [45] выделили четыре совершенные разных семейства методов MCDM: методы сравнительного превосходства; методы, основанные на теории ценности и полезности; многоцелевое программирование; методы, основанные на групповых решениях и теории переговоров. В. Белтон и Т. Стюарт [8] разработали следующую классификацию MCDM: модели измерения стоимости (Value measurement models); модели цели, стремления и эталонного уровня (Goal, aspiration, reference level models); модели сравнительного превосходства (Outranking models). Академик РАН О. И. Ларичев [46] предложил классификацию методов по типам информации, получаемой от лица, принимающего решение: основанные на количественных измерениях (используется многоцелевая теория полезности); основанные на первичных качественных измерениях и далее преобразованные в количественные переменные (методы аналитической иерархии и теории нечетких множеств); основанные на количественных измерениях, но использующие несколько индикаторов при сравнении альтернатив (методы сравнительного превосходства); основанные на качественных измерениях, не преобразованные в количественные переменные (методы вербального анализа решений).

В [28] MCDM классифицированы по трем категориям: обработка данных (компенсационные/некомпенсационные), доступность данных, подход к принятию решения (индивидуальный/групповой).

По способу обработки информации методы MCDM делятся на некомпенсационные и компенсационные [27, 44, 47]. Первые не допускают компромиссов между атрибутами. В них недостаток или неблагоприятное значение в одном атрибуте не может быть компенсировано преимуществом или благоприятным значением в каком-либо другом атрибуте. Компенсационные методы допускают компромиссы между атрибутами. Иными словами, изменения в одном атрибуте могут быть компенсированы изменениями в любых других атрибутах [27]. Компенсационные методы в зависимости от способа агрегирования могут быть поделены на аддитивные и основанные на идеальном точечном подходе [47].

С точки зрения набора данных и информации, которая применяется для принятия решений, MCDM классифицируются на четкие MCDM и нечеткие FMCDM [44, 48]. Теория нечетких множеств позволяет использовать не поддающуюся количественной оценке информацию, неполную информацию, недоступную информацию и частично неосведомленные факты в модели принятия решений [44].

Ш.-Д. Чен и Ч.-Л. Хван [48] выделили пять категорий нечетких MADM: размер решаемой проблемы (количество атрибутов и альтернатив); тип данных (нечеткие, нечеткие одноделенные, четкие и комбинация нечетких и четких); методы, в основу которых положены классические MADM (например, SAW, AHP, TOPSIS и др.); математическая техника, необходимая для применения каждого нечеткого метода MADM; основные подходы, сформированные на платформе первых четырех признаков классификации.

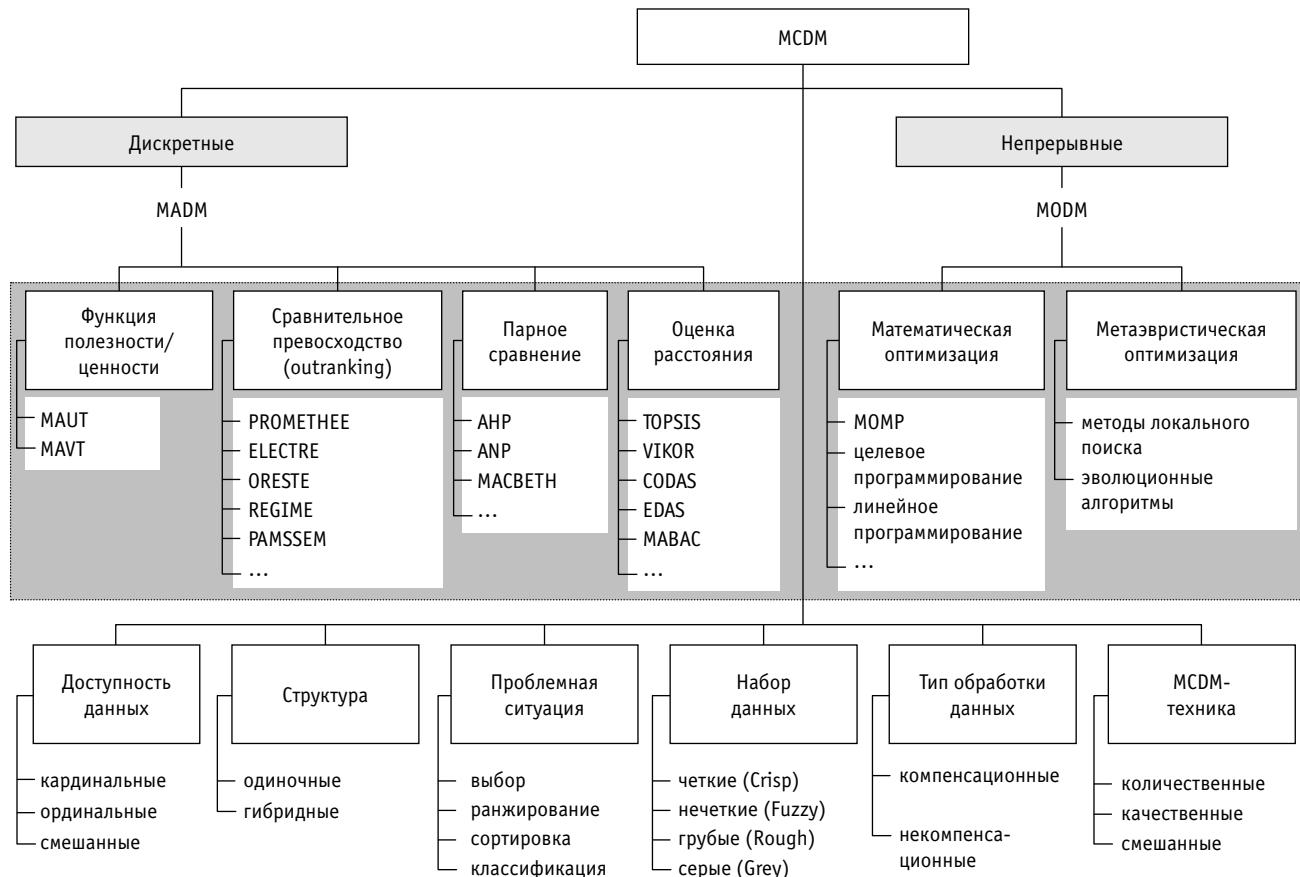


Рис. 1. Систематизация MCDM в научной литературе

В работе [41] выделены четыре группы нечетких MCDM: методы, основанные на оценке расстояния; методы сравнительного превосходства; методы на основе парного сравнения; прочие методы.

В [43] дискретные MADM классифицируются по трем группам: неэволюционного синтеза, агрегирования и сравнительного превосходства. Непрерывные MODM делятся на методы Парето с множественными решениями, методы агрегирования и лексографического упорядочивания.

Методы MODM можно классифицировать различными способами, такими как форма модели (линейная, нелинейная или стохастическая), характеристика пространства решений (например, конечное или бесконечное) либо процесс решения (например, предварительная спецификация предпочтений или интерактивный) [44].

В исследованиях [35, 49, 50] особое внимание уделяется взвешенным методам. В основу предложенной классификации методов MCDM положены две цели: выявление весовых коэффициентов критерииев и альтернативная оценка с использованием информации в матрице решений; цели и задачи MCDM. В [35, 50] взвешенные MCDA разделены на три группы: субъективные методы взвешивания, объективные методы взвешивания и комбинированные методы взвешивания. В [51] MCDM классифицированы по пяти категориям: оценка с фиксирован-

ной точкой, ранжирование, порядковое ранжирование, графическое взвешивание, парное сравнение.

В [52] предложена классификация методов принятия решения по нескольким группам атрибутов (Multiple attribute group decision making), которые поделены на две категории: процессные и содержательные методы. Методы, ориентированные на процесс, сосредоточены на процессе принятия группового решения. Их основная цель — генерация новых идей для понимания и структурирования проблемы. Содержательные методы сосредоточены на содержании проблемы для поиска оптимального решения с учетом определенных социальных либо групповых ограничений или целей.

В [53] выполнен обзор методов многомерного оценивания. Выявленные в процессе исследования сходство и различие оценочных функций положены в основу классификации использующих их методов многомерного оценивания.

В работе [38] исходя из анализа классификации MCDM предложено четыре группы гибридных методов: одиночный MCDM + одиночный MCDM; MCDM + методы учета важности критерииев; MCDM + нечеткие/серые методы; MCDM + другие методы оптимизации.

Сопоставление в научной литературе различных подходов к классификации методов MCDM представлено на рис. 1.

В целом процесс принятия решения с использованием MCDM включает три этапа.

1. Структурирование решаемой проблемы. На этом этапе решаются следующие вопросы: определение целей и задач проблемы, установление системы основных целей, критериев (субкритериев), по которым должны оцениваться альтернативы, анализ возможных решений (альтернатив), которые могут быть реализованы для достижения целей, определение лиц, принимающих решения. Полученная на данном этапе информация выступает в качестве основы для выявления того, какой метод MCDM может быть использован.

2. Определение и применение метода MCDM. Этот этап может включать в себя такие действия, как оценка важности каждого критерия по отношению к цели, оценка предпочтения каждой альтернативы по отношению к критериям, расчет общих взвешенных оценок альтернатив, агрегирование альтернативных оценок, ранжирование всех возможных альтернатив на основе общих взвешенных баллов. Использование на данном этапе различных методов MCDM влияет на конечный результат оценки.

3. Рекомендации для принятия решений. Чем выше общий взвешенный балл, тем предпочтительнее альтернатива. Полученные результаты следует дополнительно изучить, выполнив анализ чувствительности для оценки их стабильности.

Принципиальная схема использования методов MCDM представлена на рис. 2.

Сложность объектов моделирования, а также использование неточных, неоднозначных или неопределенных данных в про-

цессе принятия решений делает необходимым комбинировать MCDM с теорией нечетких множеств, грубой теорией множеств, теорией серых систем, теорией возможностей, нечеткими нейронными сетями. Перечисленные теории представляют собой эффективный инструмент работы с системами информации, которые демонстрируют несогласованность, а также способны анализировать недостаточные, противоречивые и неопределенные данные. Нечеткие или гибридные методы принятия решений чрезвычайно широко применяются для решения проблем транспортировки, логистики и выбора поставщиков, требуя эффективного управления информацией при оценке альтернативных решений и принятии оптимальных решений [54].

## МСДМ В ЛОГИСТИКЕ И НА ТРАНСПОРТЕ

Практику использования MCDM в транспортной деятельности можно поделить на две группы задач.

1. В зависимости от формы применения (решаемой проблемы):

1.1. Ранжирование решений. Это наиболее распространенная форма, которая обеспечивает общую оценку эффективности каждого решения по сравнению с другими решениями.

1.2. Определение наиболее предпочтительного решения из множества. Эта форма может быть частью процесса ранжирования, поскольку в большинстве случаев вариант, который занимает первый ранг, является наиболее предпочтительным и будет выбран для реализации.

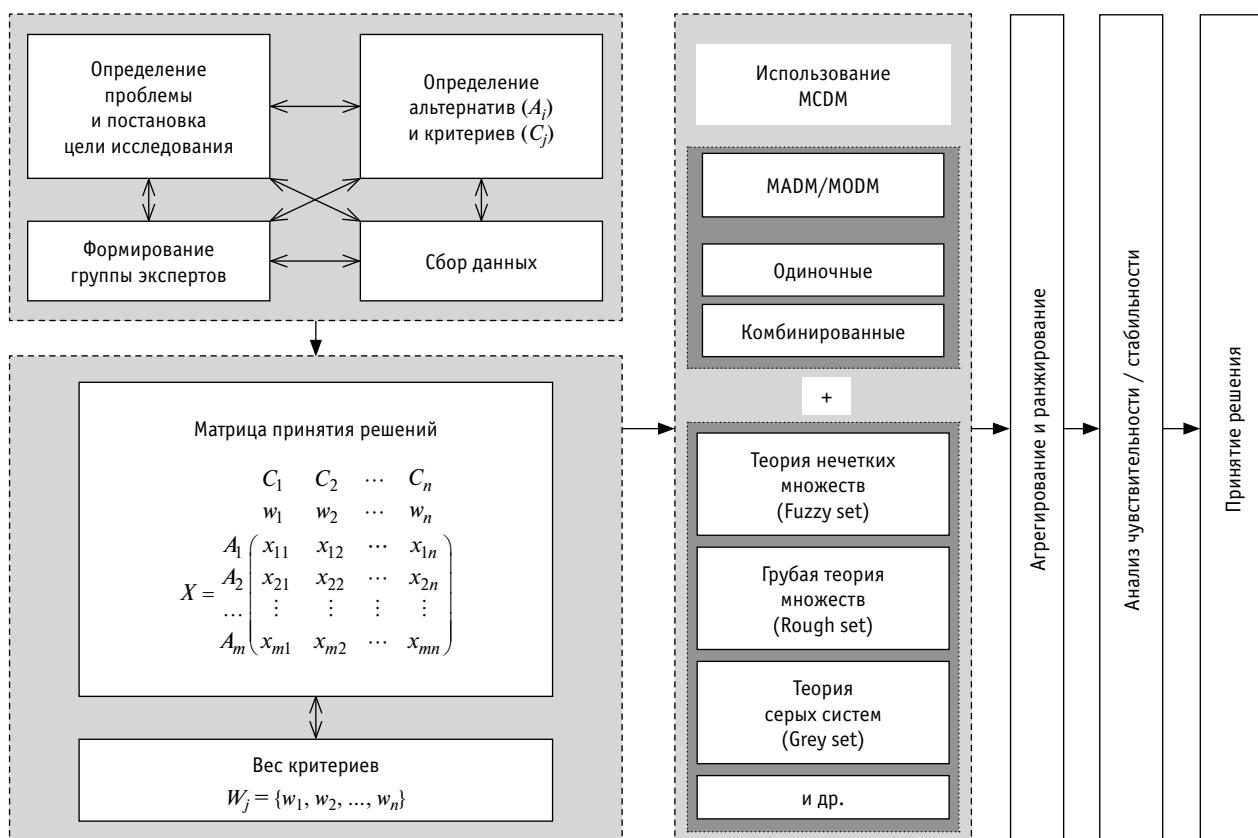


Рис. 2. Схема использования МСДМ

1.3. Классификация решений по категориям. Категории могут различаться в зависимости от конкретных характеристик решаемой проблемы. Обычно категории, найденные в соответствующей литературе, являются приемлемыми или неприемлемыми вариантами, приоритетными категориями для реализации или определением краткого списка вариантов для дальнейшей оценки.

1.4. Поиск оптимальных решений. Использование методов MODM для поиска оптимальных решений из множества решений с учетом всех имеющихся ограничений.

## 2. В зависимости от параметров оценки:

2.1. Цели решаемых задач. Чаще всего это экономическая эффективность, эффективность транспортной системы, качество услуг, защита окружающей среды, безопасность, справедливость и социальная интеграция, вклад в экономический рост.

2.2. Критерии (атрибуты) и индикаторы. Используются для оценки и измерения целей. Система индикаторов разрабатывается под конкретную цель и может быть многоуровневой. Например, для цели «защита окружающей среды» в качестве критерия (атрибута) выступает минимизация загрязнения воздуха, а соответствующим индикатором будет снижение выбросов загрязняющих веществ.

На рис. 3 показаны области использования MCDM на транспорте и при управлении цепями поставок: *а* — по видам транспорта (на основе анализа 50 статей) [4]; *б* — при управлении

цепями поставок (анализ 140 статей) [55], *в* — при реализации проектов в области транспорта (анализ 276 статей) [37], *г* — в сфере использования в транспортных системах (анализ 89 статей) [36].

В зависимости от уровня управления в цепях поставок применение методов MCDM распределяется следующим образом: 61% — стратегическое управление, 29% — тактическое и 10% — оперативное [55]. В [9] отмечается рост числа публикаций по использованию MCDM в области устойчивой инженерии: на категории «Транспорт и логистика» и «Управление цепями поставок» приходится 45% общего количества публикаций.

Наиболее часто используемыми MCDM в области транспорта и логистики являются классические методы MADM или их комбинация: теория полезности/ценности с множеством атрибутов (MAUT/MAVT), аналитический иерархический процесс (AHP), аналитический сетевой процесс (ANP), метод испытаний и оценки принятия решений (DEMATEL), метод упорядоченного предпочтения через сходство с идеальным решением (TOPSIS), исключение и выбор в условиях реальности (ELECTRE), метод организации сортировки предпочтений для оценок альтернатив (PROMETHEE), многокритериальная оптимизация и компромиссное решение (VIKOR) и др. Среди современных MADM нашли применение метод оценки аддитивного отношения (ARAS), метод совокупной взвешенной суммы

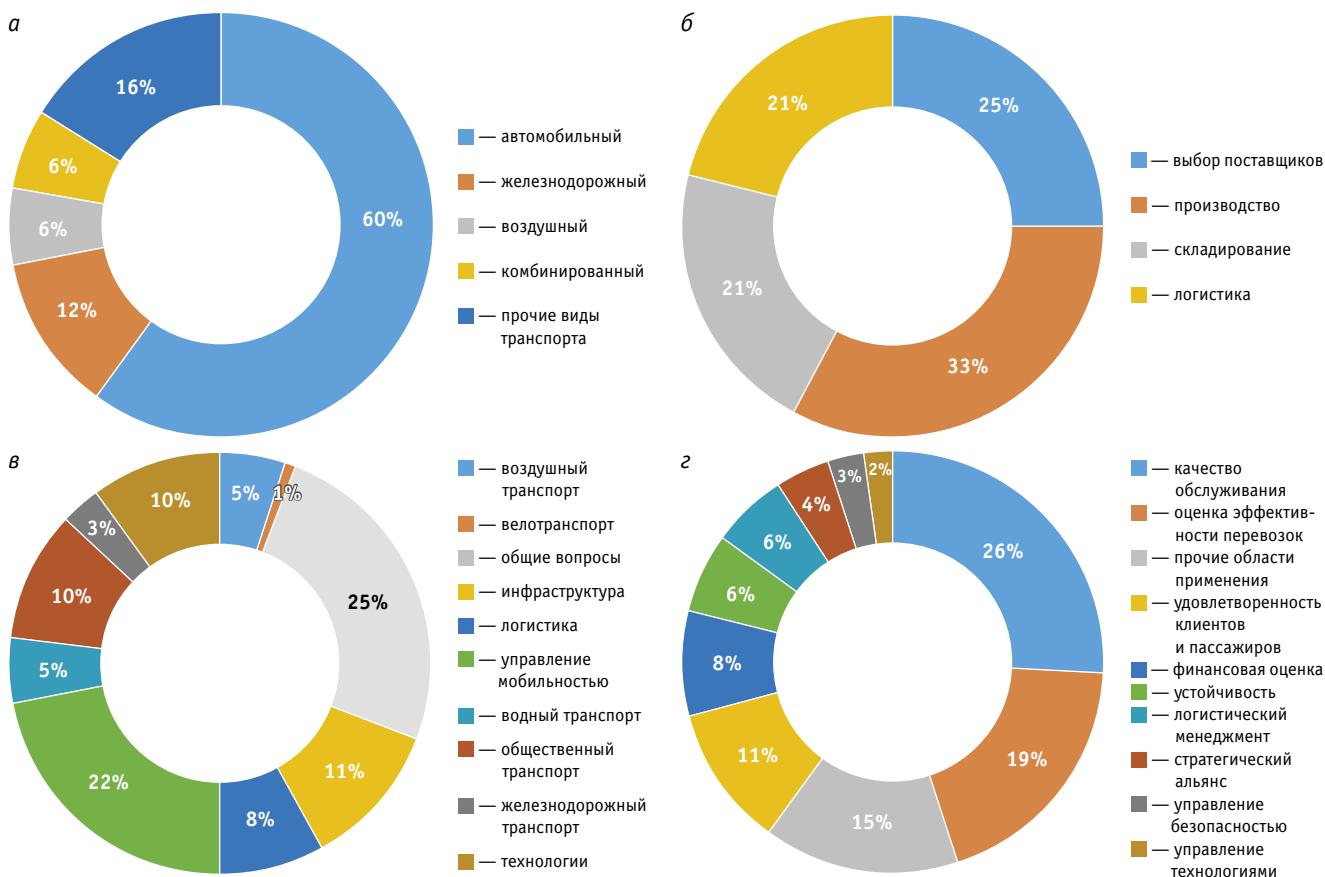


Рис. 3. Основные области использования MCDM на транспорте и в логистике

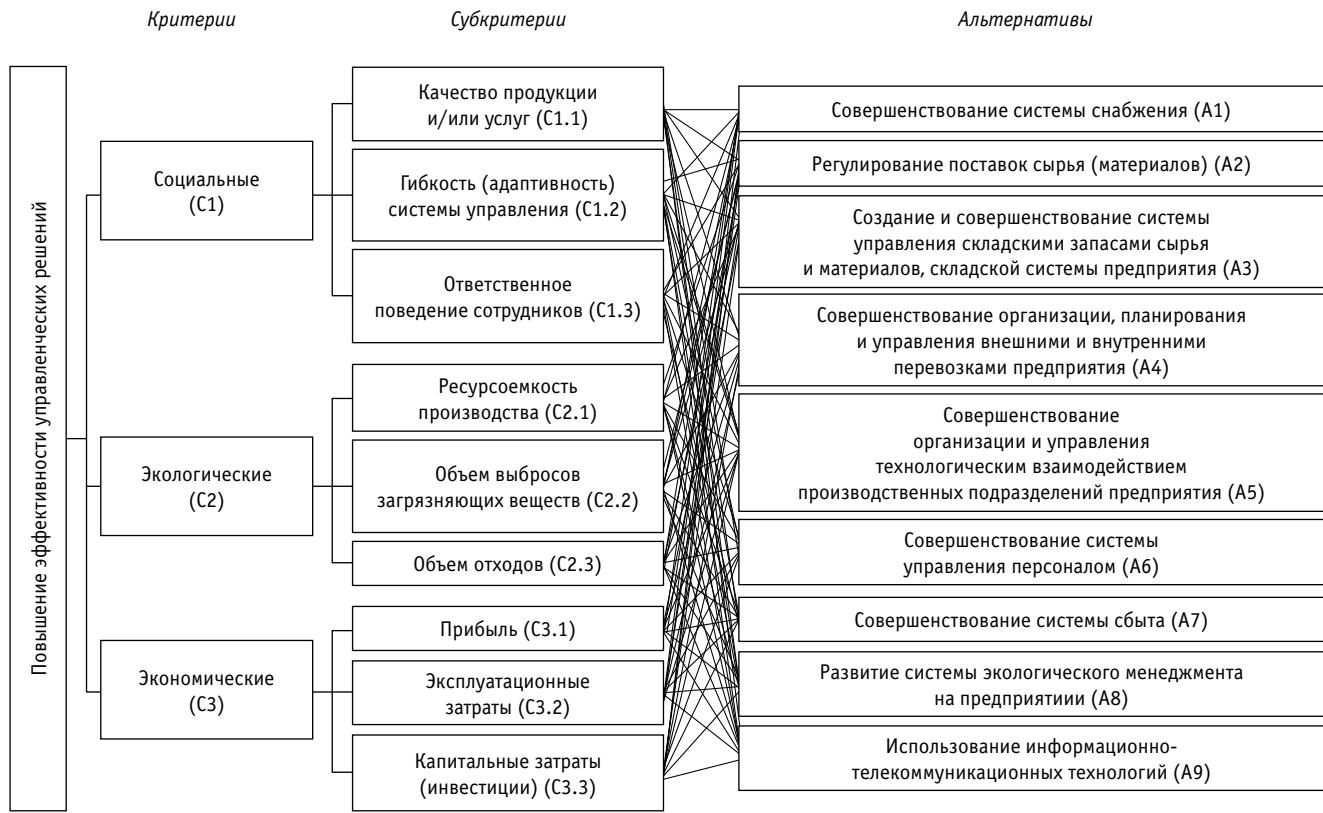


Рис. 4. Схема модели оценки эффективности управлеченческих решений

(WASPAS), метод сравнения многокритериальных разграниченных областей (MABAC), метод оценки отклонения от среднего решения (EDAS), метод комплексной пропорциональной оценки (COPRAS), многоцелевая оптимизация на основе анализа соотношений (MOORA), метод полной согласованности (FUCOM), метод оценки альтернатив и ранжирование в соответствии с компромиссным решением (MARCOS) и др.

Методы MDM, используемые для проблемы решения «бесконечных вариантов» в транспортном секторе, обычно относятся к вопросам оптимизации и менее распространены по сравнению с методами MADM.

### ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ MCDM

В качестве примера использования MCDM в настоящей работе представлена задача выбора управлеченческих решений по совершенствованию функций промышленного предприятия как логистической системы. Предполагается, что работа предприятия будет тем эффективнее, чем полнее управлеченческие решения соответствуют современным требованиям концепции устойчивого развития [56], т.е. сбалансированному сочетанию экономических, социальных и экологических требований государства и общества.

На рис. 4 представлена схема модели оценки эффективности принятия управлеченческих решений, включающая три группы критериев (C1–C3), девять субкритериев (C1.1–C3.3) и девять управлеченческих решений (альтернативы A1–A9). Методом анкетирования выполнена оценка показателей логистических

потоков при участии шести академических экспертов в области логистики и управления транспортным системами, горного дела и машиностроения (шесть докторов технических наук, средний стаж работы 26 лет).

Весовые коэффициенты критериев и субкритериев вычислялись с использованием метода полной согласованности (Full Consistency Method — FUCOM), разработанного Д. Памукаром и Ж. Стевич в 2018 г. [57]. В отличие от методов «аналитический иерархический процесс» (AHP) и «лучший худший способ» (BWM) FUCOM позволяет выполнить проверку модели (рассчитывается размер ошибки для полученных векторов веса критериев, определяется степень согласованности) и тем самым адекватно отразить ошибки в суждениях экспертов. В области транспорта метод FUCOM применялся при оценке и выборе автомобилей, работающих на альтернативных видах топлива [58], автоматически управляемых транспортных средств для складов [59], человеческих ресурсов в транспортной компании [60], местоположения логистических центров [61], безопасных участков дорожной сети [62], железнодорожных перегонов [63] и др.

Основные этапы метода FUCOM заключаются в следующем.

1. Ранжирование критериев  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  в соответствии с их значимостью, начиная с критерия, который будет иметь самый высокий вес, до критерия наименьшей значимости:

$$C_{j_{(1)}} > C_{j_{(2)}} > \dots > C_{j_{(k)}}. \quad (1)$$

2. Сравнение ранжированных критериев и определение сравнительного приоритета ( $\varphi_{k/(k+1)}$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ , где  $k$  — ранг критериев) критериев оценки:

$$\Phi = (\varphi_{1/2}, \varphi_{2/3}, \dots, \varphi_{k/(k+1)}). \quad (2)$$

3. Вычисление окончательных значений весовых коэффициентов критериев оценки  $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ . Эти значения должны удовлетворять следующим двум условиям:

а) соотношение весовых коэффициентов должно быть равно определенному на втором этапе сравнительному приоритету критериев  $\varphi_{k/(k+1)}$ :

$$\frac{\omega_k}{\omega_{k+1}} = \varphi_{k/(k+1)}; \quad (3)$$

б) окончательные значения весовых коэффициентов должны удовлетворять условию математической транзитивности, т.е.  $\varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} = \varphi_{k/(k+2)}$ . С учетом выражения (3) и  $\varphi_{(k+1)/(k+2)} = \omega_{(k+1)} / \omega_{(k+2)}$ :

$$\frac{\omega_k}{\omega_{k+1}} \otimes \frac{\omega_{k+1}}{\omega_{k+2}} = \frac{\omega_k}{\omega_{k+2}}. \quad (4)$$

Таким образом, получаем другое условие, которому должны удовлетворять конечные значения весовых коэффициентов критериев оценки:

$$\frac{\omega_k}{\omega_{k+2}} = \varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)}. \quad (5)$$

Окончательно модель определения значений весовых коэффициентов критериев оценки запишется следующим образом:

$$\min \chi,$$

$$\left| \frac{\omega_{j(k)}}{\omega_{j(k+1)}} - \varphi_{k/(k+1)} \right| = \chi, \forall j,$$

$$\left| \frac{\omega_{j(k)}}{\omega_{j(k+2)}} - \varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} \right| = \chi, \forall j, \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \forall j,$$

$$\omega_j \geq 0, \forall j.$$

В результате решения модели (6) находятся значения критериев оценки  $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$  и величины отклонения от полной согласованности ( $\chi$ ) полученных результатов.

Полученные значения весов субкритериев используются для ранжирования альтернатив А1–А9 различными методами MCDM. Для сравнения в работе использованы методы MCDM, характеристика которых приведена в табл. 2. С методикой применения каждого метода можно ознакомиться в [27, 64–72].

Таблица 2

#### Характеристика методов MCDM

Акроним метода	Полное название метода	Год	Авторы	Источник
SAW	Simple Additive Weighting Метод простого аддитивного взвешивания	1954	С. Черчман и др.	[64]
TOPSIS	Technique for the Order of Preference by Similarity to Ideal Solution Метод расстановки приоритетов по сходству с идеальным решением	1981	Ч.-Л. Хван и К. Юн	[27]
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations Метод формирования рангов предпочтения для обогащения оценок	1985	Дж. Бранс и Ф. Винке	[65]
COPRAS	COmplex PROportional ASsessment Метод комплексной пропорциональной оценки	1994	Э. К. Завадскас и др.	[66]
MOORA	Multi-Objective Optimization On The Basis of Ratio Analysis Метод многоцелевой оптимизации на основе анализа соотношений	2006	В. Брауэрс и Э. К. Завадскас	[67]
WASPAS	Weighted Aggregated Sum Product Assessment Метод совокупной взвешенной суммы	2012	Э. К. Завадскас и др.	[68]
MAIRCA	MultiAttributive Ideal-Real Comparative Analysis Метод сравнительного анализа идеального и реального с множеством атрибутов	2014	Д. Памукар и др.	[69]
EDAS	The Evaluation based on Distance from Average Solution Метод оценки отклонения от среднего решения	2015	М. Горабай и др.	[70]
MABAC	Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison Метод сравнения многокритериальных разграниченных областей	2015	Д. Памукар и др.	[71]
MARCOS	Measurement of Alternatives and Ranking according to COmpromise Solution Метод оценки альтернатив и ранжирование в соответствии с компромиссным решением	2020	Ж. Стевич и др.	[72]

Рассмотрим расчет весовых коэффициентов критериев (субкритериев) методом FUCOM. В качестве примера взяты критерии первого уровня (см. рис. 4): C1 — социальные, C2 — экологические, C3 — экономические.

Эксперты проводят ранжирование критериев в соответствии с условием (1) (табл. 3).

Выполняется попарное сравнение критериев с критерием, имеющим наивысший ранг по 9-балльной шкале [57]. В результате определяются приоритеты критериев ( $\omega_{C_{jk}}$ ) для всех рассматриваемых критериев (табл. 4).

На основании полученных приоритетов критериев рассчитываются сравнительные приоритеты критериев с использованием условия (2). Например, для оценок первого эксперта  $\varphi_{C3/C1} = 3/1 = 3$ ;  $\varphi_{C1/C2} = 5/3 = 1.6$ .

Выполняется проверка окончательных значений весовых коэффициентов по условиям (3), (4) и (5).

Для условий (3) и (4):

$$\omega_3/\omega_1 = 3; \omega_1/\omega_2 = 1.6.$$

Для условия (5):

$$\omega_3/\omega_2 = 3 \times 1.6 = 3.9.$$

С учетом выражения (6) получаем модель определения значений весовых коэффициентов критериев оценки:

$$\begin{aligned} \min \chi, \\ \left| \frac{\omega_3 - 3}{\omega_1} \right| = \chi, \quad \left| \frac{\omega_1 - 1.6}{\omega_2} \right| = \chi, \\ \left| \frac{\omega_3 - 3.9}{\omega_2} \right| = \chi, \\ \sum_{j=1}^3 \omega_j = 1, \quad \omega_j \geq 0, \forall j. \end{aligned}$$

В результате решения данной модели находим значения весовых коэффициентов критериев C1–C3 (табл. 5). Величина отклонения от полной согласованности результатов составляет  $\chi = 0.000$ , что свидетельствует об объективности полученных результатов.

Расчет весовых значений субкритериев C1.1–C3.3 выполняется аналогично. Итоговые значения весовых коэффициентов субкритериев приведены в табл. 6.

Таблица 3

Ранги критериев

Эксперты	Ранг
Эксперт 1	C3 > C1 > C2
Эксперт 2	C3 > C1 > C2
Эксперт 3	C1 > C3 > C2
Эксперт 4	C3 > C2 > C1
Эксперт 5	C3 > C2 > C1
Эксперт 6	C3 > C1 > C2

Таблица 4

Приоритеты критериев

Эксперты	Результаты оценки			
	Критерий	C3	C1	C2
Эксперт 1	Приоритет	1	3	5
	Критерий	C3	C1	C2
Эксперт 2	Приоритет	1	2	2
	Критерий	C3	C1	C2
Эксперт 3	Приоритет	1	2	4
	Критерий	C1	C3	C2
Эксперт 4	Приоритет	1	3	6
	Критерий	C3	C2	C1
Эксперт 5	Приоритет	1	3	6
	Критерий	C3	C2	C1
Эксперт 6	Приоритет	1	2	2
	Критерий	C3	C1	C2

Таблица 5

Весовые коэффициенты критериев C1–C3

Критерий	Эксперт						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
C1	0.2174	0.2500	0.5714	0.1111	0.4545	0.2500	0.3091
C2	0.1304	0.2500	0.1429	0.2222	0.0909	0.2500	0.1811
C3	0.6522	0.5000	0.2857	0.6667	0.4545	0.5000	0.5098

Таблица 6

Весовые коэффициенты субкритериев C1.1–C3.3

Вес субкритериев	C1.1	C1.2	C1.3	C2.1	C2.2	C2.3	C3.1	C3.2	C3.3
Вес в группе	0.354	0.363	0.281	0.394	0.383	0.222	0.474	0.277	0.247
Итоговый вес	0.110	0.112	0.087	0.0781	0.069	0.040	0.242	0.142	0.126

Таблица 8

## Результаты ранжирования альтернатив различными методами MCDM

Альтернатива	SAW		TOPSIS		PROMETHEE		COPRAS		MOORA	
A1	0.7883	8	0.1010	8	-0.0819	8	91.013	8	0.1060	8
A2	0.8496	3	0.1226	3	0.1225	3	97.728	4	0.1291	3
A3	0.8202	5	0.1138	6	-0.0036	5	94.580	6	0.1185	6
A4	0.8553	1	0.1231	2	0.1950	1	98.066	2	0.1309	2
A5	0.8080	7	0.1150	5	-0.0556	7	93.868	7	0.1152	7
A6	0.8551	2	0.1308	1	0.0440	4	100	1	0.1359	1
A7	0.8488	4	0.1129	7	0.1593	2	98.059	3	0.1255	4
A8	0.7218	9	0.0641	9	-0.3270	9	82.364	9	0.0749	9
A9	0.8200	6	0.1168	4	-0.0527	6	95.132	5	0.1200	5

Альтернатива	WASPAS		MAIRCA		EDAS		MABAC		MARCOS	
A1	0.4424	8	0.0463	8	0.4171	8	-0.0357	8	0.6257	8
A2	0.4770	3	0.0665	3	0.7044	3	0.1460	3	0.6743	3
A3	0.4606	5	0.0541	5	0.5600	6	0.0339	5	0.6510	5
A4	0.4801	2	0.0737	1	0.7315	2	0.2104	1	0.6789	1
A5	0.4538	7	0.0490	7	0.5308	7	-0.0123	7	0.6413	7
A6	0.4802	1	0.0588	4	0.8294	1	0.0762	4	0.6787	2
A7	0.4760	4	0.0702	2	0.6942	4	0.1787	2	0.6737	4
A8	0.4051	9	0.0221	9	0.0780	9	-0.2536	9	0.5729	9
A9	0.4606	6	0.0492	6	0.5975	5	-0.0098	6	0.6509	6

Таким образом, в результате использования метода FUCOM определены весовые коэффициенты критерии и субкритерии модели. Наиболее важные критерии, по мнению экспертов, составляют группу экономических критерии (C3). Субкритерии данной группы также имеют самые высокие веса (C3.1 = 0.241; C3.2 = 0.142; C3.3 = 0.127).

Альтернативы A1–A9 (см. рис. 4) ранжируются по важности с использованием десяти различных методов MCDM. Исходная матрица решения приведена в табл. 7. Субкритерии C1.1, C1.2, C1.3, C3.1 и C3.3 относятся к группе «выгода» (т.е. значение критерии стремится к максимуму), субкритерии C2.1, C2.2, C2.3 и C3.2 относятся к группе «затраты» (значение критерии стремится к минимуму).

Таблица 7

## Исходная матрица принятия решений

Альтернатива	max	max	max	min	min	min	max	min	max
	C1.1	C1.2	C1.3	C2.1	C2.2	C2.3	C3.1	C3.2	C3.3
A1	6.93	5.20	3.23	6.21	4.27	5.01	6.55	6.80	4.37
A2	5.70	5.16	4.35	4.70	3.31	3.79	6.92	6.87	4.91
A3	5.50	6.59	4.26	6.26	3.80	4.48	6.49	7.11	4.97
A4	5.42	6.88	4.84	4.61	5.10	3.85	7.16	7.17	4.70
A5	7.36	5.95	5.16	6.23	4.97	5.00	6.38	6.89	3.99
A6	6.24	6.92	6.81	5.26	3.76	3.69	5.93	5.67	3.37
A7	4.75	5.98	3.73	4.78	3.49	3.60	7.02	4.86	3.43
A8	4.11	4.64	4.03	5.65	6.43	6.74	5.81	5.79	4.45
A9	5.54	6.79	5.12	5.81	4.46	4.48	5.95	7.32	5.45

Результаты ранжирования альтернатив с использованием перечисленных методов представлены в табл. 8 и на рис. 5.

Анализ показывает, что наиболее предпочтительной альтернативой является A4 — совершенствование организации, планирования и управления внешними и внутренними перевозками предприятия (ранг № 1 в пяти методах и ранг № 2 еще в пяти методах), наименее предпочтительна альтернатива A8 — развитие системы экологического менеджмента на предприятии (во всех методах ранг № 9). Альтернатива A1 (совершенствование системы снабжения) получила ранг № 8 во всех десяти методах, а альтернативы A2 (регулирование поставок сырья и материалов) и A5 (совершенствование организации и управления технологическим взаимодействием производственных подразделений предприятия) имеют высокую сходимость результатов (одинаковый ранг в девяти из десяти методов). Расхождение ранга в альтернативах A3, A6 и A7 объясняется использованием в методах MCDM различных алгоритмов и способов нормализации исходной матрицы решений и агрегирования данных.

Поскольку существуют изменения в рейтинге в различных методах MCDM, статистическая корреляция рангов рассчитывается дополнительно с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена [73] (табл. 9).

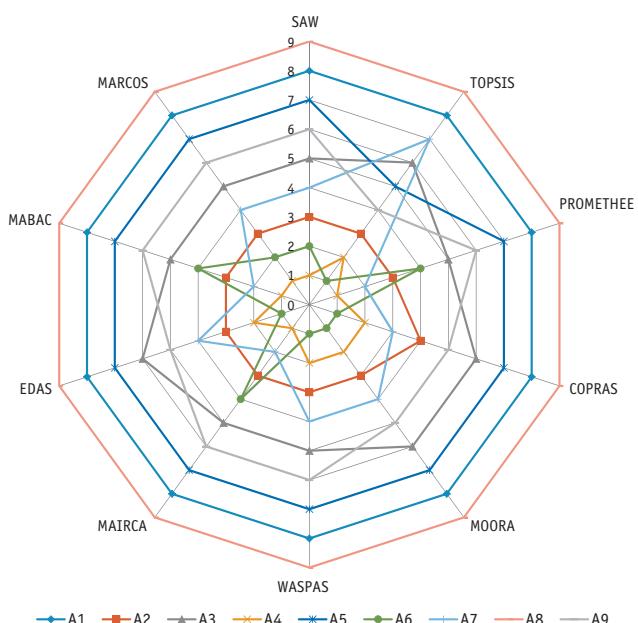


Рис. 5. Результаты ранжирования альтернатив различными методами MCDM

Таблица 9

Статистическая корреляция рангов различными методами MCDM

Метод MCDM	SAW	TOPSIS	PROMETHEE	COPRAS	MOORA	WASPAS	MAIRCA	EDAS	MABAC	MARCOS	Среднее значение
SAW	1.00	0.83	0.93	0.95	0.97	0.98	0.93	0.97	0.93	1.00	0.95
TOPSIS	0.83	1.00	0.63	0.82	0.88	0.85	0.63	0.88	0.63	0.83	0.80
PROMETHEE	0.93	0.63	1.00	0.88	0.87	0.88	1.00	0.87	1.00	0.93	0.90
COPRAS	0.95	0.82	0.88	1.00	0.98	0.98	0.88	0.98	0.88	0.95	0.93
MOORA	0.97	0.88	0.87	0.98	1.00	1.00	0.87	1.00	0.87	0.97	0.94
WASPAS	0.98	0.85	0.88	0.98	1.00	1.00	0.88	0.98	0.88	0.98	0.94
MAIRCA	0.93	0.63	1.00	0.88	0.87	0.88	1.00	0.87	1.00	0.93	0.90
EDAS	0.97	0.88	0.87	0.98	1.00	0.98	0.87	1.00	0.87	0.97	0.94
MABAC	0.93	0.63	1.00	0.88	0.87	0.88	1.00	0.87	1.00	0.93	0.90
MARCOS	1.00	0.83	0.93	0.95	0.97	0.98	0.93	0.97	0.93	1.00	0.95

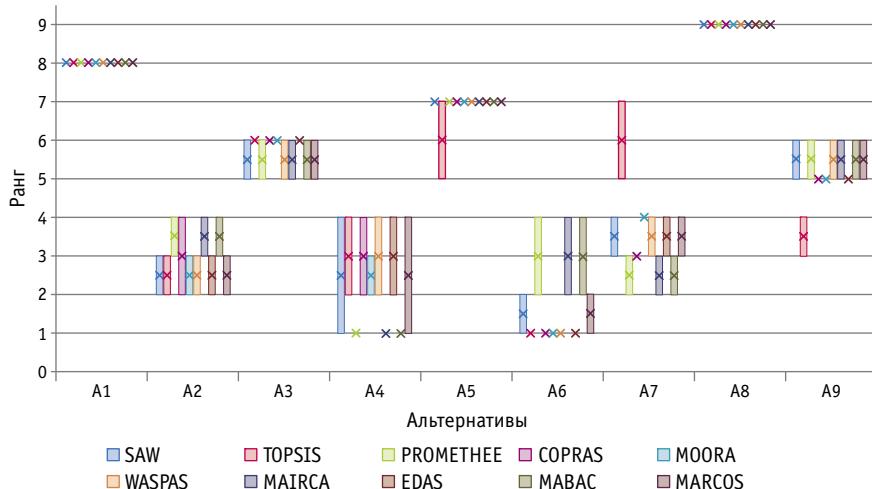


Рис. 6. Результаты анализа чувствительности

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Управление транспортной системой как сложным функциональным элементом цепи поставок предполагает анализ множества вариантов управленческих решений. Для оценки и выбора эффективных решений в настоящее время широко применяют методы MCDM.

В статье исследуется проблема использования MCDM на транспорте и в логистике. По результатам обзора научной литературы установлено, что в настоящее время существует множество подходов к классификации большого количества методов MCDM. Отмечена необходимость систематизации методов с целью повышения эффективности и надежности их применения. Попытка такой систематизации представлена в настоящей статье.

В работе рассмотрена модель MCDM и приведен расчетный пример оценки и выбора управленческих решений по совершенствованию транспортно-логистической деятельности на предприятии. В расчете использованы:

метод полной согласованности FUCOM — для определения весовых коэффициентов критерии, по которым вы-

полнена оценка девяти управленческих решений (альтернатив);

методы SAW, TOPSIS, PROMETHEE, COPRAS, MOORA, WASPAS, MAIRCA, EDAS, MABAC и MARCOS — для ранжирования управленческих решений (альтернатив).

Наиболее эффективными решениями являются совершенствование организации, планирования и управления внешними и внутренними перевозками предприятия (альтернатива A4), совершенствование системы управления персоналом (альтернатива A6), регулирование поставок сырья и материалов (альтернатива A2), которые соответственно имеют ранги № 1, № 2 и № 3. Оценка чувствительности по-

лученных результатов показала адекватность представленного подхода. Общий коэффициент ранговой корреляции Спирмена по результатам использования десяти методов MCDM составил 0.915.

Продолжение дальнейших исследований, по мнению автора, может быть связано с разработкой методики и алгоритма выбора наиболее эффективного и надежного метода MCDM и с разработкой гибридной MCDM-модели принятия управленческих решений по совершенствованию транспортно-логистической деятельности, основанной на использовании грубой теории множеств или теории серых систем.

## Литература

1. Осинцев Н. А., Рахмангулов А. Н., Багинова В. В. Инновации в области зеленой логистики // Мир транспорта. 2018. Т. 16. № 2 (75). С. 196–211. ISSN 1992–3252.
2. Osintsev N., Rakhmangulov A., Sladkowski A. Logistic flow control system in green supply chains // Ecology in Transport: Problems and Solutions, Lecture Notes in Networks and Systems. 2020. Vol. 124. Pp. 311–380.
3. Petrović G. S., Madić M., Antucheviciene J. An approach for robust decision making rule generation: Solving transport and logistics decision making problems // Expert Systems with Applications. 2018. Vol. 106. Pp. 263–276.
4. State-of-the-art review on multi-criteria decision-making in the transport sector / G. Yannis, A. Kopsacheili, A. Dragomanovits, V. Petraki // Journal of Traffic and Transportation Engineering. 2020. Vol. 7. No. 4. Pp. 413–431.
5. Multi-criteria model for the development of industrial logistics / A. N. Rakhmangulov, S. N. Kornilov, D. V. Aleksandrin, N. O. Shevkinov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 966.
6. Sierra L. A., Yépes V., Pellicer E. A review of multi-criteria assessment of the social sustainability of infrastructures // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 187. No. 8. Pp. 496–513.
7. Pardalos P., Horst R., Roy B. Multicriteria Methodology for Decision Aiding. Boston, MA : Springer US, 1996. Vol. 12. 292 p.
8. Belton V., Stewart T. J. Multiple Criteria Decision Analysis. Boston, MA : Springer US, 2002. 372 p.
9. Application of MCDM methods in sustainability engineering: a literature review 2008–2018 / M. Stojčić, E. K. Zavadskas, D. Pamučar [et al.] // Symmetry. 2019. Vol. 11. No. 3.
10. Kandakoglu A., Frini A., Ben Amor S. Multicriteria decision making for sustainable development: a systematic review // Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. 2019. Vol. 26. No. 5–6. Pp. 202–251.
11. Castro D. M., Silva Parreiras F. A review on multi-criteria decision-making for energy efficiency in automotive engineering // Applied Computing and Informatics. 2020. Vol. 17. No. 1. Pp. 53–78.
12. Beck P., Hofmann E. Multiple criteria decision making in supply chain management — Currently available methods and possibilities for future research // Die Unternehmung. 2012. Vol. 66. No. 2. Pp. 180–213.
13. Multi-criteria decision making approaches for green supply chains: a review / A. Banasik, J. M. Bloemhof-Ruwaard, A. Kanellopoulos [et al.] // Flexible Services and Manufacturing Journal. 2018. Vol. 30. No. 3. Pp. 366–396.
14. Lu K., Liao H., Zavadskas E. K. An overview of fuzzy techniques in supply chain management: Bibliometrics, methodologies, applications and future directions // Technological and Economic Development of Economy. 2021. 27. No. 2. Pp. 402–458.
15. Wątróbski J. Outline of multicriteria decision-making in green logistics // Transportation Research Procedia. 2016. Vol. 16. Pp. 537–552.
16. Rezaei J. A systematic review of multi-criteria decision-making applications in reverse logistics // Transportation Research Procedia. 2015. Vol. 10. Pp. 766–776.
17. A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015 / A. Mardani, E. K. Zavadskas, Z. Khalifah // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 71. Pp. 216–256.
18. Zavadskas E. K., Turskis Z. Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview // Technological and Economic Development of Economy. 2011. 17. No. 2. Pp. 397–427.
19. Chowdhury P., Paul S. K. Applications of MCDM methods in research on corporate sustainability: A systematic literature review // Manage-

## References

1. Osintsev N. A., Rakhmangulov A. N., Baginova V. V. Innovations in the sphere of green logistics [Innovatsii v oblasti zelenoy logistiki] // World of Transport and Transportation. 2018. Vol. 16. No. 2 (75). Pp. 196–211. ISSN 1992–3252.
2. Osintsev N., Rakhmangulov A., Sladkowski A. Logistic flow control system in green supply chains // Ecology in Transport: Problems and Solutions, Lecture Notes in Networks and Systems. 2020. Vol. 124. Pp. 311–380.
3. Petrović G. S., Madić M., Antucheviciene J. An approach for robust decision making rule generation: Solving transport and logistics decision making problems // Expert Systems with Applications. 2018. Vol. 106. Pp. 263–276.
4. State-of-the-art review on multi-criteria decision-making in the transport sector / G. Yannis, A. Kopsacheili, A. Dragomanovits, V. Petraki // Journal of Traffic and Transportation Engineering. 2020. Vol. 7. No. 4. Pp. 413–431.
5. Multi-criteria model for the development of industrial logistics / A. N. Rakhmangulov, S. N. Kornilov, D. V. Aleksandrin, N. O. Shevkinov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 966.
6. Sierra L. A., Yépes V., Pellicer E. A review of multi-criteria assessment of the social sustainability of infrastructures // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 187. No. 8. Pp. 496–513.
7. Pardalos P., Horst R., Roy B. Multicriteria Methodology for Decision Aiding. Boston, MA : Springer US, 1996. Vol. 12. 292 p.
8. Belton V., Stewart T. J. Multiple Criteria Decision Analysis. Boston, MA : Springer US, 2002. 372 p.
9. Application of MCDM methods in sustainability engineering: a literature review 2008–2018 / M. Stojčić, E. K. Zavadskas, D. Pamučar [et al.] // Symmetry. 2019. Vol. 11. No. 3.
10. Kandakoglu A., Frini A., Ben Amor S. Multicriteria decision making for sustainable development: a systematic review // Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. 2019. Vol. 26. No. 5–6. Pp. 202–251.
11. Castro D. M., Silva Parreiras F. A review on multi-criteria decision-making for energy efficiency in automotive engineering // Applied Computing and Informatics. 2020. Vol. 17. No. 1. Pp. 53–78.
12. Beck P., Hofmann E. Multiple criteria decision making in supply chain management — Currently available methods and possibilities for future research // Die Unternehmung. 2012. Vol. 66. No. 2. Pp. 180–213.
13. Multi-criteria decision making approaches for green supply chains: a review / A. Banasik, J. M. Bloemhof-Ruwaard, A. Kanellopoulos [et al.] // Flexible Services and Manufacturing Journal. 2018. Vol. 30. No. 3. Pp. 366–396.
14. Lu K., Liao H., Zavadskas E. K. An overview of fuzzy techniques in supply chain management: Bibliometrics, methodologies, applications and future directions // Technological and Economic Development of Economy. 2021. 27. No. 2. Pp. 402–458.
15. Wątróbski J. Outline of multicriteria decision-making in green logistics // Transportation Research Procedia. 2016. Vol. 16. Pp. 537–552.
16. Rezaei J. A systematic review of multi-criteria decision-making applications in reverse logistics // Transportation Research Procedia. 2015. Vol. 10. Pp. 766–776.
17. A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015 / A. Mardani, E. K. Zavadskas, Z. Khalifah // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 71. Pp. 216–256.
18. Zavadskas E. K., Turskis Z. Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview // Technological and Economic Development of Economy. 2011. 17. No. 2. Pp. 397–427.

- ment of Environmental Quality: An International Journal. 2020. 31. No. 2. Pp. 385–405.
20. Evaluation of sustainable transport research in 2000–2019 / X. Zhao, Y. Ke, J. Zuo [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 256.
21. Alinezhad A., Khalili J. New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM). Cham: Springer International Publishing, 2019. Vol. 277. 233 p.
22. Zavadskas E. K., Turskis Z., Kildienė S. State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods // Technological and Economic Development of Economy. 2014. Vol. 20. No. 1. Pp. 165–179.
23. Guitouni A., Martel J.-M. Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method // European Journal of Operational Research. 1998. Vol. 109. No. 2. Pp. 501–521.
24. Valipour A., Sarvari H., Tamošaitiene J. Risk assessment in PPP projects by applying different MCDM methods and comparative results analysis // Administrative Sciences. 2018. Vol. 8. No. 4.
25. Generalised framework for multi-criteria method selection / J. Wątrobowski, J. Jankowski, P. Ziembia [et al.] // Omega. 2019. Vol. 86. No. 1. Pp. 107–124.
26. Hwang C.-L., Masud A. S. M. Multiple Objective Decision Making — Methods and Applications: A State-of-the-Art Survey. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1979. Online-Ressource. 365 p.
27. Hwang C.-L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1981. Vol. 186. 273 p.
28. Sabaei D., Erkoyuncu J., Roy R. A Review of Multi-criteria Decision Making Methods for Enhanced Maintenance Delivery // Procedia CIRP. 2015. Vol. 37. No. 3. Pp. 30–35.
29. Sustainability in rangeland systems: Introduction of fuzzy multi objective decision making / H. Azadi, J. van den Berg, H. Peter, G. Hosseiniinia // Current World Environment. 2009. Vol. 4. No. 1. Pp. 19–32.
30. Alvarez P. A., Ishizaka A., Martínez L. Multiple-criteria decision-making sorting methods: A survey // Expert Systems with Applications. 2021. Vol. 183. No. 3. Pp. 115368.
31. Aytekin A. Comparative analysis of the normalization techniques in the context of MCDM problems // Decision Making: Applications in Management and Engineering. 2021. Vol. 4. No. 2. Pp. 1–25.
32. Mukhametzyanov I., Pamučar D. A Sensitivity analysis in MCDM problems: A statistical approach // Decision Making: Applications in Management and Engineering. 2018. 1. No. 2.
33. Macharis C. The importance of stakeholder analysis in freight transport // European Transport. 2005. Vol. 25–26. Pp. 114–126.
34. Bartholomew E., Kwakkel J. H. On considering robustness in the search phase of Robust Decision Making: A comparison of Many-Objective Robust Decision Making, multi-scenario Many-Objective Robust Decision Making, and Many Objective Robust Optimization // Environmental Modelling & Software. 2020. Vol. 127. No. 3.
35. Weighting Methods and their Effects on Multi-Criteria Decision Making Model Outcomes in Water Resources Management / N. H. Zardari, K. Ahmed, S. M. Shirazi, Z. B. Yusop. Cham: Springer International Publishing, 2015. 166 p.
36. Multiple criteria decision-making techniques in transportation systems: A systematic review of the state of the art literature / A. Mardani, E. K. Zavadskas, Z. Khalifah [et al.] // Transport. 2016. Vol. 31. No. 3. Pp. 359–385.
37. Macharis C., Bernardini A. Reviewing the use of multi-criteria decision analysis for the evaluation of transport projects: Time for a multi-actor approach // Transport Policy. 2015. Vol. 37. No. 1. Pp. 177–186.
38. Arslan H. M. Current classification of multi criteria decision analysis methods and public sector implementations // Public Finance, Pub-
19. Chowdhury P., Paul S. K. Applications of MCDM methods in research on corporate sustainability: A systematic literature review // Management of Environmental Quality: An International Journal. 2020. 31. No. 2. Pp. 385–405.
20. Evaluation of sustainable transport research in 2000–2019 / X. Zhao, Y. Ke, J. Zuo [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 256.
21. Alinezhad A., Khalili J. New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM). Cham: Springer International Publishing, 2019. Vol. 277. 233 p.
22. Zavadskas E. K., Turskis Z., Kildienė S. State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods // Technological and Economic Development of Economy. 2014. Vol. 20. No. 1. Pp. 165–179.
23. Guitouni A., Martel J.-M. Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method // European Journal of Operational Research. 1998. Vol. 109. No. 2. Pp. 501–521.
24. Valipour A., Sarvari H., Tamošaitiene J. Risk assessment in PPP projects by applying different MCDM methods and comparative results analysis // Administrative Sciences. 2018. Vol. 8. No. 4.
25. Generalised framework for multi-criteria method selection / J. Wątrobowski, J. Jankowski, P. Ziembia [et al.] // Omega. 2019. Vol. 86. No. 1. Pp. 107–124.
26. Hwang C.-L., Masud A. S. M. Multiple Objective Decision Making — Methods and Applications: A State-of-the-Art Survey. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1979. Online-Ressource. 365 p.
27. Hwang C.-L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1981. Vol. 186. 273 p.
28. Sabaei D., Erkoyuncu J., Roy R. A Review of Multi-criteria Decision Making Methods for Enhanced Maintenance Delivery // Procedia CIRP. 2015. Vol. 37. No. 3. Pp. 30–35.
29. Sustainability in rangeland systems: Introduction of fuzzy multi objective decision making / H. Azadi, J. van den Berg, H. Peter, G. Hosseiniinia // Current World Environment. 2009. Vol. 4. No. 1. Pp. 19–32.
30. Alvarez P. A., Ishizaka A., Martínez L. Multiple-criteria decision-making sorting methods: A survey // Expert Systems with Applications. 2021. Vol. 183. No. 3. Pp. 115368.
31. Aytekin A. Comparative analysis of the normalization techniques in the context of MCDM problems // Decision Making: Applications in Management and Engineering. 2021. Vol. 4. No. 2. Pp. 1–25.
32. Mukhametzyanov I., Pamučar D. A Sensitivity analysis in MCDM problems: A statistical approach // Decision Making: Applications in Management and Engineering. 2018. 1. No. 2.
33. Macharis C. The importance of stakeholder analysis in freight transport // European Transport. 2005. Vol. 25–26. Pp. 114–126.
34. Bartholomew E., Kwakkel J. H. On considering robustness in the search phase of Robust Decision Making: A comparison of Many-Objective Robust Decision Making, multi-scenario Many-Objective Robust Decision Making, and Many Objective Robust Optimization // Environmental Modelling & Software. 2020. Vol. 127. No. 3.
35. Weighting Methods and their Effects on Multi-Criteria Decision Making Model Outcomes in Water Resources Management / N. H. Zardari, K. Ahmed, S. M. Shirazi, Z. B. Yusop. Cham: Springer International Publishing, 2015. 166 p.
36. Multiple criteria decision-making techniques in transportation systems: A systematic review of the state of the art literature / A. Mardani, E. K. Zavadskas, Z. Khalifah [et al.] // Transport. 2016. Vol. 31. No. 3. Pp. 359–385.
37. Macharis C., Bernardini A. Reviewing the use of multi-criteria decision analysis for the evaluation of transport projects: Time for a multi-actor approach // Transport Policy. 2015. Vol. 37. No. 1. Pp. 177–186.

- lic Administration & Environmental Studies, Current Debates. 2018. No. 13. Pp. 241–261.
39. Tzeng G.-H., Huang J.-J. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Boca Raton, FL : CRC Press, 2011. 335 p.
40. Gupta S. M., Ilgin M. A. Multiple Criteria Decision Making Applications in Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery. CRC Press, 2017. 173 p.
41. Kaya İ., Çolak M., Terzi F. A comprehensive review of fuzzy multi criteria decision making methodologies for energy policy making // Energy Strategy Reviews. 2019. Vol. 24. No. 1. Pp. 207–228.
42. Masdari M., Khezri H. Service selection using fuzzy multi-criteria decision making: A comprehensive review // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2021. Vol. 12. No. 2. Pp. 2803–2834.
43. Syan C. S., Ramsoobag G. Maintenance applications of multi-criteria optimization: A review // Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 190. No. 1.
44. Pardalos P. M., Du D.-Z., Kahraman C. Fuzzy Multi-Criteria Decision Making. Boston, MA : Springer US, 2008. Vol. 16. 591 p.
45. Carlsson C., Fullér R. Fuzzy multiple criteria decision making: Recent developments // Fuzzy Sets and Systems. 1996. Vol. 78. No. 2. Pp. 139–153.
46. Ларичев О. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах. Москва : Логос, 2000. 296 с.
47. Jankowski P. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods // International journal of geographical information systems. 1995. Vol. 9. No. 3. Pp. 251–273.
48. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications / M. Beckmann, W. Krelle, S.-J. Chen, C.-L. Hwang. Berlin : Springer Berlin Heidelberg, 1992. Vol. 375. 552 p.
49. Singh M., Pant M. A review of selected weighing methods in MCDM with a case study // International Journal of System Assurance Engineering and Management. 2021. Vol. 12. No. 1. Pp. 126–144.
50. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making / J.-J. Wang, Y.-Y. Jing, C.-F. Zhang, J.-H. Zhao // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Vol. 13. No. 9. Pp. 2263–2278.
51. Hajkowicz S. A., McDonald G. T., Smith P. N. An evaluation of multiple objective decision support weighting techniques in natural resource management // Journal of Environmental Planning and Management. 2000. Vol. 43. No. 4. Pp. 505–518.
52. Kabak Ö., Ervural B. Multiple attribute group decision making: A generic conceptual framework and a classification scheme // Knowledge-Based Systems. 2017. Vol. 123. No. 1. Pp. 13–30.
53. Mikoni S., Burakov D. Justification and classification of evaluation fused in rating methods of multi-criteria choice // Informatics and Automation. 2020. Vol. 19. No. 6. Pp. 1131–1165.
54. Zavadskas E. K., Antucheviciene J., Chatterjee P. Multiple-Criteria Decision Making (MCDM) Techniques for Business Processes Information Management. MDPI, 2019. 322 p.
55. Khan S. A., Chaabane A., Dweiri F. T. Multi-criteria decision-making methods application in supply chain management: A systematic literature review // Multi-Criteria Methods and Techniques Applied to Supply Chain Management. IntechOpen, 2018.
56. Green logistics: element of the sustainable development concept. Part 1 / A. Rakhmangulov, A. Sladkowski, N. Osintsev, D. Muravev // Наše more. 2017. Vol. 64. No. 3. Pp. 120–126.
57. Pamučar D., Stević Ž., Sremac S. A New Model for Determining Weight Coefficients of Criteria in MCDM Models: Full Consistency Method (FUCOM) // Symmetry. 2018. Vol. 10. No. 9.
58. Pamučar D., Ecer F., Deveci M. Assessment of alternative fuel vehicles for sustainable road transportation of United States using intec-
38. Arslan H. M. Current classification of multi criteria decision analysis methods and public sector implementations // Public Finance, Public Administration & Environmental Studies, Current Debates. 2018. No. 13. Pp. 241–261.
39. Tzeng G.-H., Huang J.-J. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Boca Raton, FL : CRC Press, 2011. 335 p.
40. Gupta S. M., Ilgin M. A. Multiple Criteria Decision Making Applications in Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery. CRC Press, 2017. 173 p.
41. Kaya İ., Çolak M., Terzi F. A comprehensive review of fuzzy multi criteria decision making methodologies for energy policy making // Energy Strategy Reviews. 2019. Vol. 24. No. 1. Pp. 207–228.
42. Masdari M., Khezri H. Service selection using fuzzy multi-criteria decision making: A comprehensive review // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2021. Vol. 12. No. 2. Pp. 2803–2834.
43. Syan C. S., Ramsoobag G. Maintenance applications of multi-criteria optimization: A review // Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 190. No. 1.
44. Pardalos P. M., Du D.-Z., Kahraman C. Fuzzy Multi-Criteria Decision Making. Boston, MA: Springer US, 2008. Vol. 16. 591 p.
45. Carlsson C., Fullér R. Fuzzy multiple criteria decision making: Recent developments // Fuzzy Sets and Systems. 1996. Vol. 78. No. 2. Pp. 139–153.
46. Larichev O. Theory and methods of decision-making, as well as a Chronicle of events in Magical countries [Teoriya i metody prinyatiya resheniy, a takzhe Khronika sobytiy v Volshebnykh stranakh]. Moscow : Logos, 2000. 296 p.
47. Jankowski P. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods // International journal of geographical information systems. 1995. Vol. 9. No. 3. Pp. 251–273.
48. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications / M. Beckmann, W. Krelle, S.-J. Chen, C.-L. Hwang. Berlin : Springer Berlin Heidelberg, 1992. Vol. 375. 552 p.
49. Singh M., Pant M. A review of selected weighing methods in MCDM with a case study // International Journal of System Assurance Engineering and Management. 2021. Vol. 12. No. 1. Pp. 126–144.
50. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making / J.-J. Wang, Y.-Y. Jing, C.-F. Zhang, J.-H. Zhao // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Vol. 13. No. 9. Pp. 2263–2278.
51. Hajkowicz S. A., McDonald G. T., Smith P. N. An evaluation of multiple objective decision support weighting techniques in natural resource management // Journal of Environmental Planning and Management. 2000. Vol. 43. No. 4. Pp. 505–518.
52. Kabak Ö., Ervural B. Multiple attribute group decision making: A generic conceptual framework and a classification scheme // Knowledge-Based Systems. 2017. Vol. 123. No. 1. Pp. 13–30.
53. Mikoni S., Burakov D. Justification and classification of evaluation fused in rating methods of multi-criteria choice // Informatics and Automation. 2020. Vol. 19. No. 6. Pp. 1131–1165.
54. Zavadskas E. K., Antucheviciene J., Chatterjee P. Multiple-Criteria Decision Making (MCDM) Techniques for Business Processes Information Management. MDPI, 2019. 322 p.
55. Khan S. A., Chaabane A., Dweiri F. T. Multi-criteria decision-making methods application in supply chain management: A systematic literature review // Multi-Criteria Methods and Techniques Applied to Supply Chain Management. IntechOpen, 2018.
56. Green logistics: element of the sustainable development concept. Part 1 / A. Rakhmangulov, A. Sladkowski, N. Osintsev, D. Muravev // Наše more. 2017. Vol. 64. No. 3. Pp. 120–126.
57. Pamučar D., Stević Ž., Sremac S. A New Model for Determining Weight Coefficients of Criteria in MCDM Models: Full Consistency Method (FUCOM) // Symmetry. 2018. Vol. 10. No. 9.

- grated fuzzy FUCOM and neutrosophic fuzzy MARCOS methodology // The Science of the total environment. 2021. Vol. 788.
59. A multi-criteria model for evaluation and selection of AGV's in a warehouse / M. Stojčić, Ž. Stević, A. Nikolić, Z. Božićković // Modern Problems of Russian Transport Complex. 2019. Vol. 9. No. 1. Pp. 4–20.
60. Stević Ž., Brković N. A Novel integrated FUCOM–MARCOS model for evaluation of human resources in a transport company // Logistics. 2020. Vol. 4. No. 1.
61. Novel fuzzy composite indicators for locating a logistics platform under sustainability perspectives / H. Ayadi, N. Hamani, L. Kermad, M. Benaissa // Sustainability. 2021. Vol. 13. No. 7.
62. A Novel CRITIC-Fuzzy FUCOM-DEA-Fuzzy MARCOS model for safety evaluation of road sections based on geometric parameters of road / J. Mitrović Simić, Ž. Stević, E. K. Zavadskas [et al.] // Symmetry. 2020. Vol. 12. No. 12.
63. Multi-criteria FUCOM–MAIRCA model for the evaluation of level crossings: Case study in the Republic of Serbia / D. Pamučar, V. Lukovac, D. Božanić, N. Komazec // Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications. 2019. Vol. 1. No. 1. Pp. 108–129.
64. Churchman C. W., Ackoff R. L. An Approximate Measure of Value // Journal of the Operations Research Society of America. 1954. Vol. 2. No. 2. Pp. 172–187.
65. Brans J. P., Vincke P. Note — A Preference Ranking Organisation Method // Management Science. 1985. 31. No. 6. Pp. 647–656.
66. Zavadskas E. K., Kaklauskas A., Sarka V. The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects // Technological and Economic Development of Economy. 1994. Vol. 1. No. 3. Pp. 131–139.
67. Brauers W. K. M., Zavadskas E. K. The MOORA method and its application to privatization in a transition economy // Control and Cybernetics. 2006. Vol. 35. No. 2. Pp. 445–469.
68. Zavadskas E. K., Turskis Z., Antucheviciene J. Optimization of weighted aggregated sum product assessment // Electronics and Electrical Engineering. 2012. Vol. 122. No. 6. Pp. 3–6.
69. Pamučar D., Vasin L., Lukovac V. Selection of railway level crossing for investing in security equipment using hybrid DEMATEL–MAIRCA model // XVI International Scientific-expert Conference on Railways, 2014. Pp. 89–92.
70. Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS) / M. Kesavarz-Ghorabaei, E. K. Zavadskas, L. Olfat, Z. Turskis // Informatica. 2015. Vol. 26. No. 3. Pp. 435–451.
71. Pamučar D., Ćirović G. The selection of transport and handling resources in logistics centers using multi-attributive border approximation area comparison (MABAC) // Expert Systems with Applications. 2015. Vol. 42. No. 6. Pp. 3016–3028.
72. Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to C0mpromise solution (MARCOS) / Ž. Stević, D. Pamučar, A. Puška, P. Chatterjee // Computers & Industrial Engineering. 2020. Vol. 140.
73. Conover W. J. Practical nonparametric statistics. New York : Chichester John Wiley, 1999. 608 p.
58. Pamučar D., Ecer F., Deveci M. Assessment of alternative fuel vehicles for sustainable road transportation of United States using integrated fuzzy FUCOM and neutrosophic fuzzy MARCOS methodology // The Science of the total environment. 2021. Vol. 788.
59. A multi-criteria model for evaluation and selection of AGV's in a warehouse / M. Stojčić, Ž. Stević, A. Nikolić, Z. Božićković // Modern Problems of Russian Transport Complex. 2019. Vol. 9. No. 1. Pp. 4–20.
60. Stević Ž., Brković N. A Novel integrated FUCOM–MARCOS model for evaluation of human resources in a transport company // Logistics. 2020. Vol. 4. No. 1.
61. Novel fuzzy composite indicators for locating a logistics platform under sustainability perspectives / H. Ayadi, N. Hamani, L. Kermad, M. Benaissa // Sustainability. 2021. Vol. 13. No. 7.
62. A Novel CRITIC-Fuzzy FUCOM-DEA-Fuzzy MARCOS model for safety evaluation of road sections based on geometric parameters of road / J. Mitrović Simić, Ž. Stević, E. K. Zavadskas [et al.] // Symmetry. 2020. Vol. 12. No. 12.
63. Multi-criteria FUCOM–MAIRCA model for the evaluation of level crossings: Case study in the Republic of Serbia / D. Pamučar, V. Lukovac, D. Božanić, N. Komazec // Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications. 2019. Vol. 1. No. 1. Pp. 108–129.
64. Churchman C. W., Ackoff R. L. An Approximate Measure of Value // Journal of the Operations Research Society of America. 1954. Vol. 2. No. 2. Pp. 172–187.
65. Brans J. P., Vincke P. Note — A Preference Ranking Organisation Method // Management Science. 1985. 31. No. 6. Pp. 647–656.
66. Zavadskas E. K., Kaklauskas A., Sarka V. The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects // Technological and Economic Development of Economy. 1994. Vol. 1. No. 3. Pp. 131–139.
67. Brauers W. K. M., Zavadskas E. K. The MOORA method and its application to privatization in a transition economy // Control and Cybernetics. 2006. Vol. 35. No. 2. Pp. 445–469.
68. Zavadskas E. K., Turskis Z., Antucheviciene J. Optimization of weighted aggregated sum product assessment // Electronics and Electrical Engineering. 2012. Vol. 122. No. 6. Pp. 3–6.
69. Pamučar D., Vasin L., Lukovac V. Selection of railway level crossing for investing in security equipment using hybrid DEMATEL–MAIRCA model // XVI International Scientific-expert Conference on Railways, 2014. Pp. 89–92.
70. Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS) / M. Kesavarz-Ghorabaei, E. K. Zavadskas, L. Olfat, Z. Turskis // Informatica. 2015. Vol. 26. No. 3. Pp. 435–451.
71. Pamučar D., Ćirović G. The selection of transport and handling resources in logistics centers using multi-attributive border approximation area comparison (MABAC) // Expert Systems with Applications. 2015. Vol. 42. No. 6. Pp. 3016–3028.
72. Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to C0mpromise solution (MARCOS) / Ž. Stević, D. Pamučar, A. Puška, P. Chatterjee // Computers & Industrial Engineering. 2020. Vol. 140.
73. Conover W. J. Practical nonparametric statistics. New York : Chichester John Wiley, 1999. 608 p.

Объем статьи 1,95 авторских листа

УДК 620.178.311.4

Алексей Вячеславович Якушев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,  
 Александр Васильевич Смолянинов, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,  
 Константин Михайлович Колясов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## СТРУКТУРНО-ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ ВАГОНОСТРОЕНИЯ

Alexey Vyacheslavovich Yakushev, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Alexander Vasilyevich Smolyaninov, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Konstantin Mikhaylovich Kolyasov, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

## Structural and phenomenological models of metals for car manufacturing

### Аннотация

В статье приведены примеры негативных изменений механических свойств металлов, в том числе литой стали 20Л, используемых для изготовления несущих деталей тележек грузовых вагонов, с ростом циклической наработки.

С целью исследования взаимосвязи механических свойств выполнено математическое описание процессов, протекающих при одноосном квазистатическом растяжении в представительном объеме хрупких и вязких сталей для вагоностроения после различной циклической наработки. Известные модели конструкционных сталей дополнены моделью Миронова — Якушева, которая учитывает стадию разупрочнения в отдельных зернах микроструктуры и пригодна для изучения хрупко-вязких сталей. Поврежденность металла исследована методом превентивных разгрузок на стадии закритического деформирования с построением полных диаграмм при растяжении испытуемого объема металла и сопоставлена с результатами испытаний натурных образцов.

Результаты моделирования показали снижение всех механических свойств металлов после наработки и наличие взаимосвязи с диаграммой растяжения.

**Ключевые слова:** механические свойства, разупрочнение, квазистатическое растяжение, полная диаграмма растяжения, модель металла, наработка.

### Summary

The paper provides examples of negative changes of mechanical properties of metals, including 20L cast steel, that are used in manufacturing of bearing elements of bogies for freight cars, which are manifested with growth of cyclic operating time.

In order to study relationship of mechanical properties the authors have carried out a mathematical description of processes occurring at uniaxial quasi-static stretching in representative volume of fragile and viscous steel for car manufacturing with various cyclic operating time. Well known models of structural steel are supplemented by the Mironov — Yakushev model that considers a softening stage in separate microstructural seeds and that is useful for studying fragile and viscous steel. The authors have studied damage of steel by a method of preventive unloading on a stage of post-failure deformation with a construction of full tensile stress-strain diagrams at stretching of studied volume of metal and have compared with results of tests of full-scale samples.

Results of modeling show a decrease of all mechanical properties of metals after operating time and an interaction with the tensile stress-strain diagram.

**Keywords:** mechanical properties, softening, quasi-static stretching, full tensile stress-strain diagram, metal model, operating time.

### ВВЕДЕНИЕ

Структурно-феноменологический подход к моделированию стадий образования и развития усталостных трещин в конструкционных сталях для грузового вагоностроения впервые был использован в работах [1, 2]. Континуальная механика, или механика рассеянного разрушения, представляет собой раздел механики деформируемого твердого тела, в котором структурно-феноменологический подход применяется для исследований поврежденности сплошной среды микродефектами. Этот раздел механики открыт относительно недавно Ю. Н. Работновым [3] и Л. М. Качановым см. в [4]. Объем материала представляется в виде сплошной среды со структурной неоднородностью, в котором от воздействия деформаций протекают структурные преобразования, появляются микропоры, происходят эволюционные процессы, возникает разрыхление структуры материала. Разрушение материала рассматривается как феномен, а степень его разрыхления перед разрушением характеризуется средним феноменологическим показателем — поврежденностью  $\omega$ . Такой подход к описанию поврежденности материалов в континуальной механике, получивший название струк-

турно-феноменологического, соотносит преобразования микроструктуры с макроявлением в твердом теле, например с видимыми деформациями, трещинами и разрушением.

Фундаментальные модели микронеоднородных конструкционных материалов, описание стадий деформирования и разрушения заложены профессором С.Д. Волковым и его последователями — механиками Д.С. Волковым, В.В. Струженовым, В.И. Мироновым и др. Эксперименты В.И. Миронова на однократных образцах из чугуна и хромистой средненуглеродистой стали выявили некоторые взаимосвязи между параметрами полной диаграммы при осевом растяжении (ПДР) и механическими свойствами после различной наработки [5]. Оказалось, что снижение механических свойств материала с увеличением циклической наработки приводит к деградации параметров ПДР. Лабораторные исследования, продолженные на литых стальях класса 20Л для изготовления несущих деталей тележек грузовых вагонов, подтвердили наличие таких взаимосвязей [6].

Учет негативных изменений механических свойств в расчетах несущих деталей тележек грузовых вагонов на сопротивление усталости крайне важен, так как они могут быть значительными [7]. В настоящее время в действующих нормативах критериями прочности для грузовых вагонов считаются значения механических свойств стали в состоянии поставки, а деградация свойств за 32 года службы вагона не учитывается. Экспертные заключения о причинах разрушения боковых рам тележек грузовых вагонов в сети железных дорог строятся на основе сравнения механических свойств стали разрушенной детали и в состоянии поставки, что не соответствует физическим представлениям о природе усталостного разрушения.

В связи с этим научная задача, позволяющая не только описать негативное изменение механических свойств сталей для грузового вагоностроения после циклической наработки, наблюдаемое в лабораторных испытаниях однократных образцов методом ПДР и в испытаниях стандартных образцов, но и установить качественные зависимости, является актуальной. Решение обозначенной

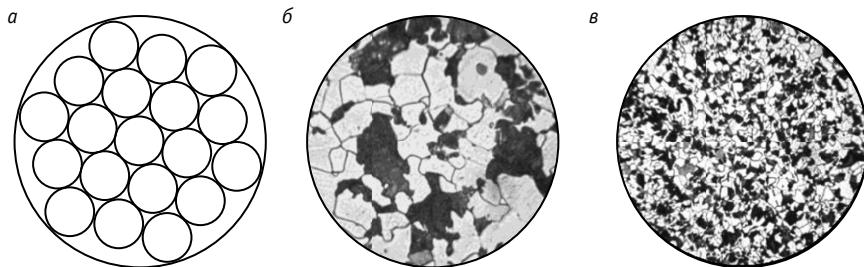


Рис. 1. Микроструктура металла в состоянии поставки:  
поперечное сечение модели металла (а) и литой стали 20ГЛ при увеличении  $\times 500$  (б) и  $\times 100$  (в)

проблемы даст возможность создавать модели сталей, содержащие параметры поврежденности с увеличением наработки, уточнять прогнозы усталостной долговечности литых деталей тележек грузовых вагонов.

### МОДЕЛИ МЕТАЛЛОВ

Стали марок 20ГЛ, 20ГФЛ и 20ГТЛ для изготовления надрессорных балок и боковых рам литых конструкций после нормализации обладают феррито-перлитной микроструктурой (рис. 1б, 1в), в которой твердость феррита и перлита различается на порядок, а значит, имеется структурная неоднородность по механическим свойствам. При помощи структурно-феноменологического подхода феррито-перлитную микроструктуру металла моделируют независимыми цилиндрическими стержнями конечной длины, свободно упакованными в связку квадратного поперечного сечения (рис. 1а), создавая испытуемый образец. Такой модельный образец позволяет назначать отличные друг от друга исходные механические свойства отдельным стержням, контролировать изменение площади поперечного

сечения после упругой разгрузки разрушенных стержней и образования микропор. Количество стержней в модели металла сопоставимо с количеством зерен микроструктуры. Например, по данным металлографических исследований стали 20ГТЛ, после нормализации при среднем диаметре зерен  $1,42 \times 10^{-2}$  мм (величина зерна номер 9 по ГОСТ 5639-82) в  $1 \text{ mm}^2$  помещается 3602 зерна. На основе этих данных можно представить модель образца с количеством стержней 3602 шт.

Применительно к литым сталям для изготовления несущих деталей вагонов модель металла может состоять из стержней одного вида разрушения: хрупкого (рис. 2а), вязкого (рис. 2б) или хрупко-вязкого (рис. 2в). Все три вида разрушения характерны для таких режимов термообработки деталей из литых легированных сталей класса 20Л, как закалка (корпус автосцепки, тяговый хомут) и нормализация (рама боковая, балка надрессорная, передний и задний упоры и др.). В табл. 1-3 приведены уравнения совместности деформаций для трех видов разрушения модельного образца.

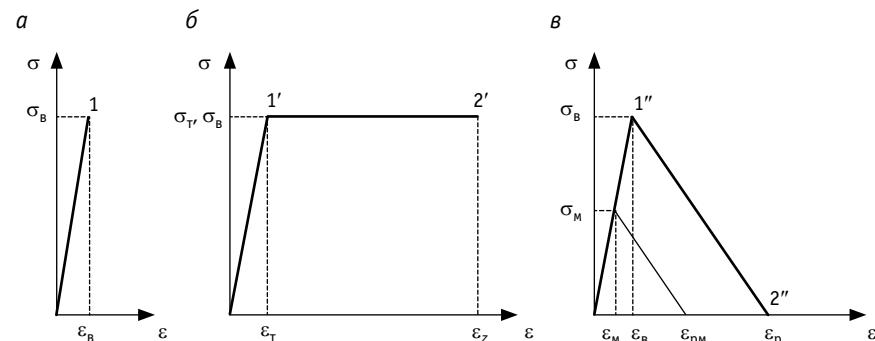


Рис. 2. Схематизация диаграммы одноосного растяжения

отдельного стержня модельного образца:

а — хрупкого (модель Даниэльса); б — вязкого (модель Мазинга);  
в — хрупко-вязкого (модель Миронова — Якушева)

Таблица 1

Основные уравнения для модели хрупкого металла (модель Даниэльса)

Уравнения	Обозначения
Уравнение равновесия	$\sigma = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \sigma_k$
Физические	$\begin{cases} \sigma_k = E\varepsilon, 0 < \varepsilon < \varepsilon_{Bk} \\ 0, \varepsilon \geq \varepsilon_{Bk} \end{cases}$
Модуль упругости при разгрузке	$E_u = \frac{\varepsilon_{B\beta} - \varepsilon}{\varepsilon_{B\beta} - \varepsilon_{B\alpha}} E$
Модуль упругости текущий	$E_p(\varepsilon) = d\sigma / d\varepsilon$
Коэффициент поперечной деформации при разгрузке	$v_u(\varepsilon) = \frac{v}{E} E_u(\varepsilon)$
Коэффициент поперечной деформации текущий	$v_p(\varepsilon) = \frac{v}{E} E_p(\varepsilon)$

Таблица 2

Основные уравнения для модели вязкого металла (модель Мазинга)

Уравнения	Обозначения
Уравнение равновесия	$\sigma = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \sigma_k$
Физические	$\begin{cases} \sigma_k = E\varepsilon, 0 < \varepsilon < \varepsilon_{Tk} \\ \sigma_k = \sigma_{Tk}, \varepsilon_{Tk} < \varepsilon < \varepsilon_{z_k} \\ 0, \varepsilon \geq \varepsilon_{z_k} \end{cases}$
Модуль упругости при разгрузке	$E_u = \frac{\varepsilon_{z\beta} - \varepsilon}{\varepsilon_{z\beta} - \varepsilon_{za}} E$
Модуль упругости текущий	$E_p(\varepsilon) = d\sigma / d\varepsilon$
Коэффициент поперечной деформации при разгрузке	$v_u(\varepsilon) = \frac{v}{E} E_u(\varepsilon)$
Коэффициент поперечной деформации текущий	$v_p(\varepsilon) = d\varepsilon' / d\varepsilon$

Циклическое нагружение модельного образца количеством от нулевых циклов  $n$  неизбежно приводит к снижению деформации временного сопротивления стержней по закону [6]

$$\varepsilon_{Bk}(\varepsilon_M, n) = \varepsilon_{Bk}^0 - k_\varepsilon n^{\alpha(\varepsilon_M)}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — показатель степени кривой усталости;

$k_\varepsilon$  — показатель, определяемый из условия усталостного разрушения стержня от наибольшей деформации цикла  $\varepsilon_M$ :

$$\varepsilon_{Bk}(\varepsilon_M, N_k) = \varepsilon_M, \quad (2)$$

где  $N_k$  — долговечность стержня с номером  $k$ .

## НЕГАТИВНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

На рис. 3–5 [6] представлены диаграммы для хрупкого, вязкого и хрупко-вязкого металлов в состоянии поставки, а также после различной циклической наработки. Диаграммы построены на основе уравнений из табл. 1–3 и уравнений (1)–(2) с учетом распределения случайных деформаций временного сопротивления, пределов текучести и разрушения 1 тыс. стержней диаметром 1 мм и модулем упругости  $E = 2 \cdot 10^4$  МПа по нормальному закону. Специально разработанные авторские программы на языке программирования Visual Basic for Applications в программе Microsoft Access позволяют обсчитывать модели образцов, в которых диаметр стального стержня будет равен размеру зерна микроструктуры литьей стали 20ГТЛ, а количество стержней в модели испытуемого образца может соответствовать количеству зерен в 1  $\text{мм}^2$  микрошлифа стали 20ГТЛ. Автоматизированное построение графиков для всех исследуемых функций после расчетов сокращает время исследований.

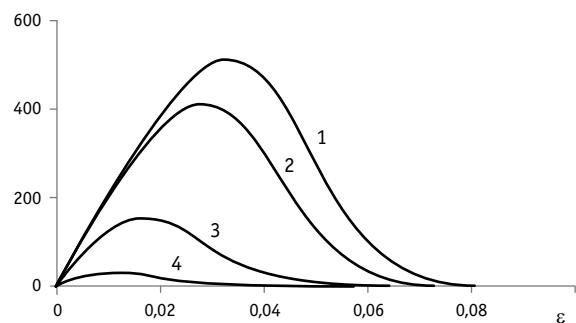
Коэффициент поперечной деформации при нагружении  $v_p(\varepsilon)$  принимает отрицательные значения (см. рис. 3–5), если количество разрушенных стержней в структуре модельного образца становится больше, чем неразрушенных. Разрушенный стержень в хрупком и хрупко-вязком образце разгружается упруго без остаточной деформации и раздвигает соседние стержни в модели, увеличи-

Таблица 3

Основные уравнения для модели хрупко-вязкого металла  
(модель Миронова — Якушева)

Уравнения	Обозначения
Уравнение равновесия	
$\sigma = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \sigma_k$	$\varepsilon_{Bk}$ — напряжение временного сопротивления в стержне с номером $k$ , МПа;
Физические	$D$ — модуль разупрочнения;
$\begin{cases} \sigma_k = E\varepsilon, 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{Bk} \\ \sigma_k = \sigma_{Bk} - D(\varepsilon - \varepsilon_{Bk}), \varepsilon_{Bk} \leq \varepsilon < \varepsilon_{pk} \\ 0, \varepsilon \geq \varepsilon_{pk} \end{cases}$	$\varepsilon_{pk}$ — деформация разрушения отдельного стержня модели с номером $k$
Модуль упругости стержня при разгрузке после временного сопротивления	
$E_u(\varepsilon) = \frac{E\varepsilon_B - D(\varepsilon - \varepsilon_B)}{\varepsilon}$	
Модуль упругости текущий	
$E_p(\varepsilon) = d\sigma / d\varepsilon$	
Коэффициент поперечной деформации стержня при разгрузке после временного сопротивления	
$v_u(\varepsilon) = \nu \frac{E\varepsilon_B - D(\varepsilon - \varepsilon_B)}{E\varepsilon}$	
Коэффициент поперечной деформации текущий	
$v_p(\varepsilon) = \frac{\nu}{E} E_p(\varepsilon)$	

а  $\sigma$ , МПа



б

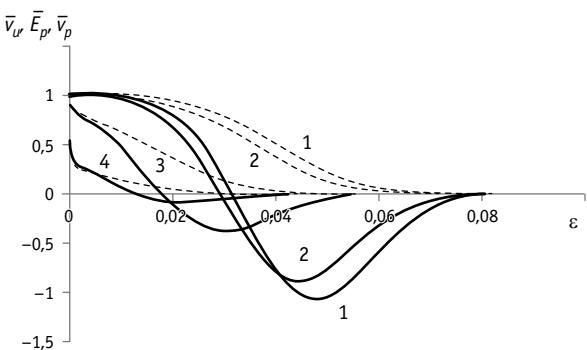


Рис. 3. Диаграммы растяжения модельного образца при хрупком разрушении после циклических наработок  $n_0 = 0$  (кривые 1),  $n_1 = 10^4$  (кривые 2),  $n_2 = 12,5 \cdot 10^4$  (кривые 3),  $n_3 = 13,5 \cdot 10^4$  (кривые 4):  
а — полные диаграммы; б — функции  $E(\varepsilon)$  и  $v(\varepsilon)$ :  
при активном деформировании и разгрузке (штриховые линии)  
в относительных координатах

вый образец в диаметре, что подтверждается в экспериментах с чугуном методом полных диаграмм деформирования [5]. Диаграммы касательных модулей  $v_p$  и  $E_p$  показывают связь с полной диаграммой растяжения (см. рис. 3–5) во всех типах изучаемых металлов для вагоностроения даже после циклического нагружения.

Наработка приводит к негативным изменениям предела текучести, временного сопротивления, модуля упругости и разупрочнения, предельной деформации (см. рис. 3–5). Отметим, что полученный на рис. 3–5 характер вырождения полных диаграмм растяжения справедлив для классических циклических разупрочняющихся сталей, у которых снижение всех параметров ПДР происходит после первых циклов нагружений и продолжается с ростом наработки. Литые стали для грузового вагоностроения класса 20Л могут быть циклически упрочняющимися, например сталь 20ГЛ (рис. 6) [6], и циклически разупрочняющимися, например сталь 20ФЛ (рис. 7) [6]. Моделирование процессов деформирования упрочняющихся сталей методом ПДР — очень сложная задача и не составляет цель данной статьи. Однако классическая классификация сталей по склонности к упрочнению при наработке в зависимости от

прочностных свойств [8] не совсем корректна, так как некоторые параметры ПДР стабильны или снижаются с первых циклов нагружений, например модуль упругости  $E$  и предельная деформация  $\varepsilon_p$  (см. рис. 3–5).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение процесса негативного изменения механических свойств сталей для грузового вагоностроения после циклической наработки на построенных структурно-феноменологических моделях методом полных диаграмм деформирования позволяют сделать основные выводы и рекомендации.

1. Циклическая наработка приводит к неизбежному снижению модуля упругости стали, коэффициента поперечной деформации, предела текучести, временного сопротивления, модуля разупрочнения, предельной деформации.

2. Предложенная модель металла Миронова — Якушева для хрупко-вязкого разрушения, наряду с уже известными моделями хрупкого и вязкого металлов, дает возможность оценивать несущую способность и запас сопротивления усталости сталей в зависимости от доли вязкой и хрупкой составляющих в макроструктуре, оптимально подбирать режим термообработки.

3. Модуль упругости сталей падает при существенном разрушении микроструктуры в результате разрушения отдельных структурных элементов, что видно после наработки, близкой к долговечности модельного образца, и подтверждается в экспериментах с натуральными образцами из стали 20ГЛ.

4. Предложенные структурно-феноменологические модели металлов, приближенные к свойствам литых сталей для изготовления несущих деталей грузовых вагонов, параметры

которых чувствительны к циклическому нагружению, открывают новые возможности для прогнозирования их усталостной долговечности.

5. Развитием настоящей работы может стать создание модели металла с присутствием одновременно хрупких и вязких структурных элементов, позволяющей более точно имитировать однородную феррито-перлитную микроструктуру литых сталей для вагоностроения.

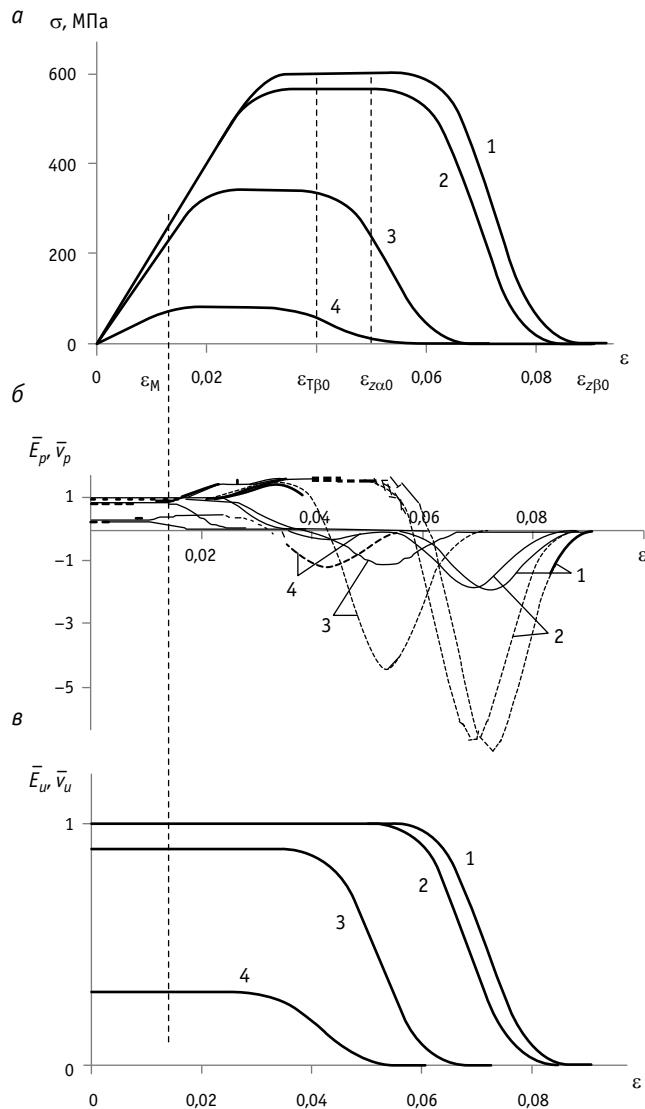


Рис. 4. Диаграммы растяжения модельного образца при вязком разрушении после циклических наработок  
 $n_0 = 0$  (кривые 1),  $n_1 = 10^4$  (кривые 2),  
 $n_2 = 13,5 \cdot 10^4$  (кривые 3),  $n_3 = 14,5 \cdot 10^4$  (кривые 4):  
а — полные диаграммы; б — функции  $E_p(\varepsilon)$  и  $v_p(\varepsilon)$   
(штриховые линии) в относительных координатах;  
в — функции  $E_u(\varepsilon)$  и  $v_u(\varepsilon)$  в относительных координатах

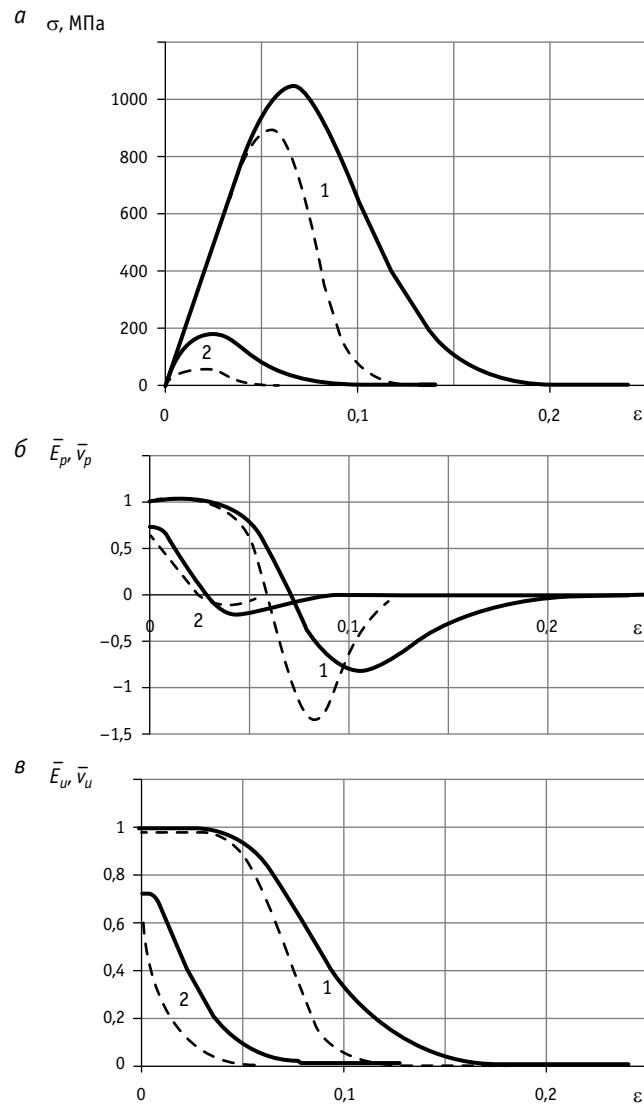
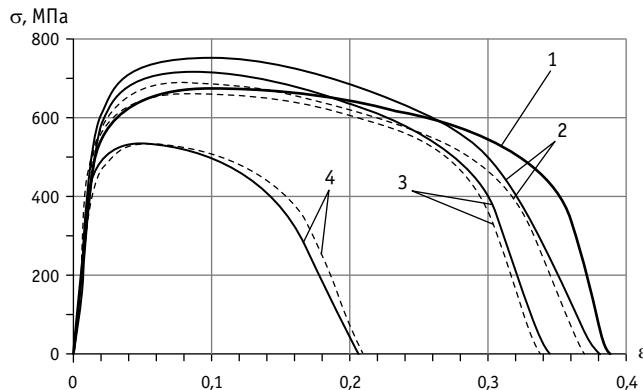
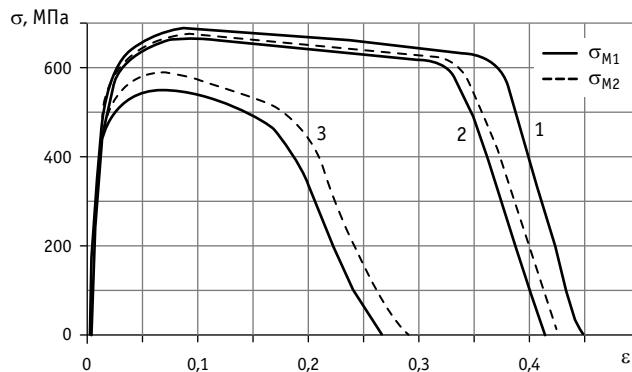


Рис. 5. Диаграммы растяжения модельного образца при хрупко-вязком и хрупком (штриховые линии) разрушениях после циклических наработок  
 $n_1 = 0$  (кривые 1),  $n_2 = 13,5 \cdot 10^4$  (кривые 2):  
а — полные диаграммы; б — функции  $E_p(\varepsilon)$  и  $v_p(\varepsilon)$   
в относительных координатах; в — функции  $E_u(\varepsilon)$  и  $v_u(\varepsilon)$   
в относительных координатах



**Рис. 6. Негативные изменения параметров полной диаграммы натурных образцов из стали 20ГЛ после нормализации при одноосном растяжении:**

1 — в состоянии поставки; 2 —  $n_1 = 2000$  циклов на уровнях  $\sigma_{M1}$  и  $\sigma_{M2}$  (штриховые линии); 3 —  $n_2 = 22400$  циклов на уровне  $\sigma_{M1}$ ,  $n_2 = 14000$  циклов на уровне  $\sigma_{M2}$  (штриховые линии); 4 —  $n_3 = 50960$  циклов на уровне  $\sigma_{M1}$ ,  $n_3 = 32340$  циклов на уровне  $\sigma_{M2}$  (штриховые линии)



**Рис. 7. Негативные изменения параметров полной диаграммы натурных образцов из стали 20ФЛ после нормализации при одноосном растяжении:**

1 — в состоянии поставки; 2 —  $\bar{n} = 0,3$  цикла; 3 —  $\bar{n} = 0,6$  цикла

## Литература

1. Миронов В. И., Якушев А. В. Метод полных диаграмм в расчете ресурса элементов подвижного состава // Транспорт Урала. 2007. № 2 (13). С. 57–61. ISSN 1815–9400.
2. Якушев А. В., Миронов В. И. Об одном подходе к расчету долговечности элементов конструкций с учетом стадии развития усталостной трещины // Проблемы и перспективы развития грузового вагоностроения : материалы научно-технической конференции / Под науч. ред. проф. А. В. Смольянинова. Екатеринбург : УрГУПС, 2007. С. 196–205.
3. Работнов Ю. Н. О механизме длительного разрушения // Вопросы прочности материалов и конструкций. Москва : АН СССР, 1959. С. 5–7.
4. Степанова Л. В., Игонин С. А. Описание рассеянного разрушения: параметр поврежденности Ю. Н. Работнова: историческая справка, фундаментальные результаты и современное состояние // Вестник СамГУ. 2014. № 3 (114). С. 97–114. ISSN 1810–5378.
5. Стружанов В. В., Миронов В. И. Деформационное разупрочнение материала в элементах конструкций. Екатеринбург : УрО РАН, 1995. 190 с.
6. Якушев А. В., Миронов В. И., Рузметов Я. О. Прогнозирование усталостного ресурса литых деталей тележек грузовых вагонов : монография. Ташкент : Complex Print, 2021. 136 с.
7. Северинова Т. П. Исследование трещиностойкости сталей литых деталей тележек грузовых вагонов после длительного периода эксплуатации // Вестник ВНИИЖТ. 1999. № 3. С. 35–40. ISSN 2223–9731.
8. Золоторевский В. С. Механические свойства металлов. Москва : МИСиС, 1998. 400 с.

Объем статьи 0,7 авторских листа

## References

1. Mironov V. I., Yakushev A. V. Method of full diagrams in calculation of life of rolling stock elements [Metod polnykh diagramm v raschete resursa elementov podvizhnogo sostava] // Transport of the Urals. 2007. No. 2 (13). Pp. 57–61. ISSN 1815-9400.
2. Yakushev A. V., Mironov V. I. On one approach to calculation of life of structural elements with the consideration for development stage of fatigue crack [Ob odnom podkhode k raschetu dolgovechnosti elementov konstruktsiy s uchetom stadii razvitiya ustalostnoy treshchiny] // Problems and prospects of development of freight car manufacturing : proceedings of the scientific and technical conference / Ed. by Professor A. V. Smolyaninov. Ekaterinburg : USURT, 2007. Pp. 196–205.
3. Rabotnov Yu. N. On mechanism of prolonged destruction [O mekhanizme dlitel'nogo razrusheniya] // Issues of strength of materials and structures. Moscow : USSR Academy of Sciences, 1959. Pp. 5–7.
4. Stepanova L. V., Igonin S. A. Description of deterioration processes: damage parameter of Yu. N. Rabotnov: historical remarks, fundamental results and contemporary state [Opisanie rassseyannogo razrusheniya: parametr povrezhdennosti Yu. N. Rabotnova: istoricheskaya spravka, fundamental'nye rezul'taty i sovremennoe sostoyanie] // Vestnik of Samara State University. 2014. No. 3 (114). Pp. 97–114. ISSN 1810-5378.
5. Struzhanov V. V., Mironov V. I. Deformational softening of material in structural elements [Deformatsionnoe razuprochnenie materiala v elementakh konstruktsiy]. Ekaterinburg : Ural branch of Russian Academy of Sciences, 1995. 190 p.
6. Yakushev A. V., Mironov V. I., Ruzmetov Ya. O. Forecasting of fatigue life for cast elements of bogies for freight cars [Prognozirovaniye ustalostnogo resursa litykh detalei telezhek gruzovykh vagonov] : monograph. Tashkent : Complex Print, 2021. 136 p.
7. Severinova T. P. Study of crack resistance of steel for cast elements of bogies of freight cars after long period of operation [Issledovanie treshchinstoykosti staley litykh detalei telezhek gruzovykh vagonov posle dlytel'nogo perioda ekspluatatsii] // VNIIZhT Scientific Journal. 1999. No. 3. Pp. 35–40. ISSN 2223-9731.
8. Zolotorevskiy V. S. Mechanical properties of metals [Mekhanicheskie svoystva metallov]. Moscow : MISIS, 1998. 400 p.

УДК 519.71: 51-74: 656.2: 681.5: 303.732.4: 62.752: 621.534: 629.4.015

Роман Сергеевич Большаков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия,

Андрей Павлович Хоменко, доктор технических наук, профессор, ректор Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия,

Сергей Викторович Елисеев, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, советник при ректорате по научной работе Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ НА СОРТИРОВОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Roman Sergeevich Bolshakov, PhD in Engineering, Associate Professor, Control of Operational Work Department, Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, Russia,

Andrey Pavlovich Khomenko, DSc in Engineering, Professor, Rector of Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, Russia,

Sergey Victorovich Eliseev, DSc in Engineering, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Rectorial Advisor for Scientific Work, Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, Russia

### New approaches of condition estimation of freight railway carriages at motion on sorting devices on base system analysis and mathematical modeling

#### Аннотация

Статья посвящена развитию методов системного анализа и технологии управления динамическими состояниями технических средств железнодорожного транспорта.

Использованы методы структурного математического моделирования, в рамках которого расчетная схема объекта, рассматриваемая в качестве механической колебательной системы с несколькими степенями свободы, интерпретируется как эквивалентная в динамическом отношении система автоматического управления.

Проанализированы задачи динамики сцепки двух грузовых вагонов при двух вариантах ее жесткости (обычное и жесткое закрепление шарнирного типа).

Показано, что при определенном выборе значений моментов инерции вагонов и параметров расположения центра масс можно решать задачи стабилизации движения.

Представлены концепции экспериментального определения момента инерции и координат центра масс при скатывании вагонов с сортировочной горки и прохождении специального измерительного поста.

Предложены алгоритмы, с использованием которых можно определить значения параметров центра масс вагонов и значения момента инерции.

**Ключевые слова:** безопасность движения поездов, динамика железнодорожного транспорта, системный анализ, механические колебательные системы, измерение параметров, передаточные функции.

#### Summary

The paper develops methods of system analysis and technologies for control dynamic conditions of technical means of railway transport.

Methods of structural mathematical modeling are used, within the framework of which the design scheme of the object, considered as a mechanical oscillatory system with several degrees of freedom, is interpreted as a dynamically equivalent automatic control system.

The problems of the dynamics of the coupling of two freight railway carriages with two variants of its rigidity (conventional and rigid hinge-type fastening) are considered.

It is shown that with a certain choice of the values of the moments of inertia of the railway carriages and the parameters of the location of the center of mass, it is possible to solve the problems of motion stabilization.

Concepts are proposed for the experimental determination of the moment of inertia and coordinates of the center of mass of the railway carriage when rolling the cars off the marshalling hump and passing a special measuring station.

Algorithms for determining the values of the parameters of the center of mass of the railway carriage and the values of the moment of inertia are proposed.

**Keywords:** safety of motion trains, dynamics of railway transport, system analysis, mechanical oscillation systems, parameter measurement, transfer functions.

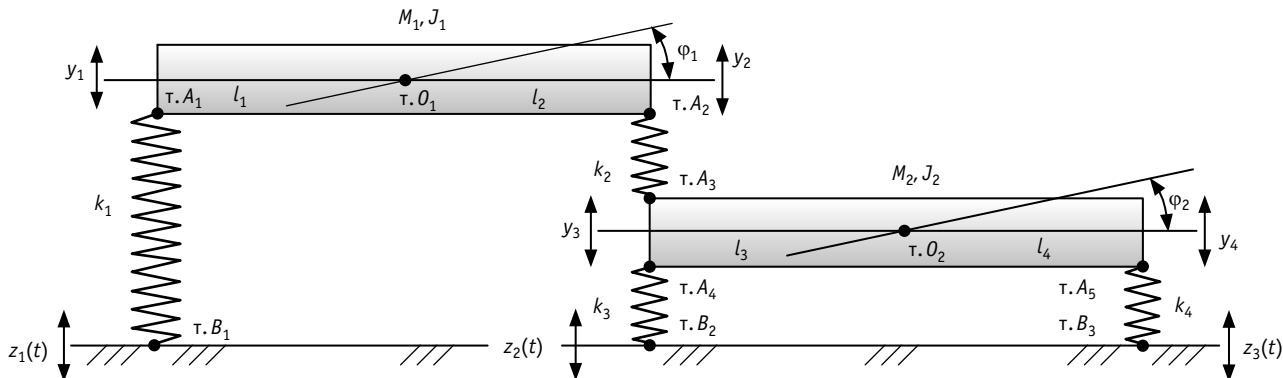


Рис. 1. Расчетная схема сцепки двух грузовых вагонов

## ВВЕДЕНИЕ

**Ж**елезнодорожный транспорт — один из важнейших факторов развития производственно-экономического базиса России, что инициирует особое внимание к повышению надежности и безопасности перевозочных процессов. Многие вопросы, связанные с обеспечением безопасности железнодорожного транспорта, работающего в условиях интенсивного динамического нагружения, нашли отражение в трудах отечественных ученых (например, [1, 2]). К числу важнейших проблем развития железнодорожного транспорта относятся увеличение скоростей движения, значительный рост веса поездов и нагрузок на колесные пары, что требует усиления мер по предупреждению отказов, случаев несокрушимых перевозок, неравномерностей различного вида и др. [3–5].

Эксплуатация железнодорожного транспорта в условиях динамического нагружения часто рассматривается как задача движения технических средств при вибрационных воздействиях, что связано с особенностями взаимодействия элементов в контактах «рельс — колесо» [6–8].

Особенность работы технических средств железнодорожного транспорта заключается в сложности процессов взаимодействия объектов подвижного состава и рельсового пути, что требует соответствующего внимания, контроля и оценки технического состояния подвижного состава [9–13].

Технические средства железнодорожного транспорта можно отнести к объектам, исследование и оценка динамических состояний которых связана с использованием развитого математического аппарата и программных средств вычислительного моделирования [9].

Многие задачи динамики подвижного состава получили свое отражение в технологиях подготовки и формирования грузовых составов, детализации представлений о движении по перегону с учетом состояния верхнего строения пути, возможных скоростей движения и особенностей перевозимых грузов.

Как показывает практика транспортных перевозок, при детализированном изучении причин непредвиденных происшествий существенное значение имеет равномерность распределения в составе обладающих различными массоинерционными параметрами подвижных средств.

Повышение эффективности перевозочных процессов требует увеличения скорости движения, веса поездов, осевых на-

грузок, для чего необходимо учитывать множество факторов, отражающих качество загрузки, выполнение условий равномерного распределения нагрузок в составе и т.д.

Вопросам организации загрузки вагонов уделяется большое внимание. Это нашло отражение в работах отечественных ученых, в том числе Х. Т. Туранова [12], что в конечном счете привело к созданию специальных технических систем, контролирующих и вес вагонов, и ряд других параметров непосредственно при сортировке вагонов и формировании составов. При этом режимы движения вагонов создаются при помощи спуска с сортировочной горки. Вместе с тем развитие упомянутых подходов нуждается в расширении представлений о параметрах, характеризующих свойства подвижных средств, в том числе о расположении центра масс и величины момента инерции.

В предлагаемой статье рассматриваются особенности динамических взаимодействий двух перемещаемых сцепленных грузовых вагонов по рельсовому пути, создающему возмущения кинематической природы.

Развивается методологическая основа построения математических моделей технических средств, имеющих в своем составе твердые тела, соединенные шарнирными связями.

Отметим, что в рамках методов системного анализа расчетная схема взаимодействующих объектов рассматривается как механическая колебательная система с несколькими степенями свободы.

## НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Представление технических объектов железнодорожного транспорта, работающих в условиях интенсивного динамического нагружения, в виде механических колебательных систем широко используется в решении задач динамики железнодорожного транспорта [6–8, 14].

В данном случае сцепка двух грузовых вагонов представлена механической колебательной системой с четырьмя степенями свободы. Система состоит из двух блоков в виде твердых тел (рис. 1), опирающихся на опорные поверхности с помощью упругих элементов с жесткостями  $k_1$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ , а также одного упругого элемента с жесткостью  $k_2$ , который реализуется в соединениях двух твердых тел по координатам  $y_2$  и  $y_3$ .

Таблица 1

Коэффициенты системы уравнений (4)–(7) в операторной форме

$a_{11}$ $(M_1 a_1^2 + J_1 c_1^2)p^2 + k_1$	$a_{12}$ $-(J_1 c_1^2 + M_1 a_1 b_1)p^2$	$a_{13}$ 0	$a_{14}$ 0
$a_{21}$ $-(J_1 c_1^2 + M_1 a_1 b_1)p^2$	$a_{22}$ $(M_1 b_1^2 + J_1 c_1^2)p^2 + k_2$	$a_{23}$ $-k_2$	$a_{24}$ 0
$a_{31}$ 0	$a_{32}$ $-k_2$	$a_{33}$ $(M_2 a_2^2 + J_2 c_2^2)p^2 + k_3$	$a_{34}$ $-(J_2 c_2^2 + M_2 a_2 b_2)p^2$
$a_{41}$ 0	$a_{42}$ 0	$a_{43}$ $-(J_2 c_2^2 + M_2 a_2 b_2)p^2$	$a_{44}$ $(M_2 b_2^2 + J_2 c_2^2)p^2 + k_4$
Обобщенные силы			
$\bar{Q}_1 = k_1 \bar{z}_1$	$\bar{Q}_2 = 0$	$\bar{Q}_3 = k_3 \bar{z}_2$	$\bar{Q}_4 = k_4 \bar{z}_3$

Твердые тела обладают массами  $M_1$ ,  $M_2$  и моментами инерции  $J_1$ ,  $J_2$  соответственно.

Если иметь в виду расчетную схему, то технический объект (см. рис. 1) представляет собой механическую колебательную систему из двух твердых тел с массоинерционными параметрами  $M_1$ ,  $J_1$  и  $M_2$ ,  $J_2$ , где  $M_1$ ,  $M_2$  — массы тел,  $J_1$ ,  $J_2$  — моменты инерции твердых тел относительно центров тяжести (точки  $O_1$ ,  $O_2$ ) соответственно. В составе механической колебательной системы используются упругие элементы  $k_1$ – $k_4$ , имеющие точки закрепления  $A_1$ – $A_5$  и  $B_1$ – $B_3$  с твердыми телами и опорными поверхностями.

Внешние возмущения имеют кинематическую природу и обозначены как  $z_1(t)$ – $z_3(t)$ . Движение системы рассматривается в координатах  $y_1$ – $y_4$ , связанных с неподвижным базисом.

Запишем выражения для кинетической и потенциальной энергий, используя ряд соотношений параметров системы и вспомогательные системы координат  $y_{01}$ ,  $y_{02}$  и  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  ( $y_{01}$ ,  $y_{02}$  — координаты центров тяжести,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  — углы поворота твердых тел относительно точек  $O_1$  и  $O_2$ ).

Кинетическая и потенциальная энергии, необходимые для вывода выражений на основе уравнений Лагранжа второго рода [15], имеют вид:

$$T = \frac{1}{2} M_1 \dot{y}_{01}^2 + \frac{1}{2} J_1 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} M_2 \dot{y}_{01}^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\varphi}_2^2; \quad (1)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_2 - z_2)^2 + \frac{1}{2} k_3 (y_3 - z_3)^2 + \frac{1}{2} k_4 (y_4 - z_4)^2. \quad (2)$$

В (1) и (2) приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} y_{01} &= a_1 y_1 + b_1 y_2; \quad y_{02} = a_2 y_3 + b_2 y_4; \\ \varphi_1 &= c_1 (y_2 - y_1); \quad \varphi_2 = c_2 (y_4 - y_3); \\ a_1 &= \frac{l_2}{l_1 + l_2}; \quad b_1 = \frac{l_1}{l_1 + l_2}; \quad c_1 = \frac{1}{l_1 + l_2}; \\ a_2 &= \frac{l_4}{l_3 + l_4}; \quad b_2 = \frac{l_3}{l_3 + l_4}; \quad c_2 = \frac{1}{l_3 + l_4}. \end{aligned} \quad (3)$$

Предполагается, что исходная система (см. рис. 1) обладает линейными свойствами и совершает под действием внешних возмущений  $z_1(t)$ ,  $z_2(t)$ ,  $z_3(t)$  малые колебания относительно статического равновесия или установившегося движения.

Математическая модель (см. рис. 1) представляет собой систему из четырех обыкновенных дифференциальных линейных уравнений с постоянными коэффициентами.

После интегральных преобразований Лапласа при нулевых начальных условиях исходная математическая модель может быть записана в операторной форме:

$$a_{11} \bar{y}_1 + a_{12} \bar{y}_2 + a_{13} \bar{y}_3 + a_{14} \bar{y}_4 = \bar{Q}_1; \quad (4)$$

$$a_{21} \bar{y}_1 + a_{22} \bar{y}_2 + a_{23} \bar{y}_3 + a_{24} \bar{y}_4 = \bar{Q}_2; \quad (5)$$

$$a_{31} \bar{y}_1 + a_{32} \bar{y}_2 + a_{33} \bar{y}_3 + a_{34} \bar{y}_4 = \bar{Q}_3; \quad (6)$$

$$a_{41} \bar{y}_1 + a_{42} \bar{y}_2 + a_{43} \bar{y}_3 + a_{44} \bar{y}_4 = \bar{Q}_4. \quad (7)$$

Коэффициенты системы уравнений (4)–(7) приведены в табл. 1.

Из анализа табл. 1 можно сделать некоторые заключения. В частности, при выполнении условий  $(J_1 c_1^2 - M_1 a_1 b_1)p^2 = 0$  движение по координате  $\bar{y}_1$  не будет оказывать влияния на движение по координате  $\bar{y}_2$ . В свою очередь, при выполнении условия  $(J_2 c_2^2 - M_2 a_2 b_2)p^2 = 0$  движение по координате  $\bar{y}_3$  также не будет оказывать влияния на движение по координате  $\bar{y}_4$ .

Отметим, что движения по координатам  $\bar{y}_2$  и  $\bar{y}_3$  связаны между собой. Таким образом, для рассматриваемого случая, когда сцепка обладает сравнительно малой жесткостью ( $k_2$ ), колебания по координатам  $\bar{y}_2$  и  $\bar{y}_3$  будут влиять друг на друга, тогда как движения по координатам  $\bar{y}_1$  и  $\bar{y}_4$  при определенных условиях не проявляют прямой связи  $\bar{y}_2 \rightarrow \bar{y}_3$ .

## ОБОСНОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРОВ МАСС И МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ ВАГОНОВ

Рассматривается случай сцепки двух грузовых вагонов в условиях, когда  $k_2$  имеет большие значения ( $k_2 \rightarrow \infty$ ). С учетом связности движений по координате  $y_3$  из-за наличия шарнира выражение для кинетической энергии принимает вид:

$$T = \frac{1}{2} M_1 (a \dot{y}_1 + b_1 \dot{y}_3)^2 + \frac{1}{2} M_2 (a_2 \dot{y}_3 + b_2 \dot{y}_4)^2 + \frac{1}{2} (M_1 a_1^2 + M_2 a_2^2)^2 \dot{y}_3 + \frac{1}{2} J_{01} (\dot{y}_3 - \dot{y}_1)^2 + \frac{1}{2} J_{02} (\dot{y}_3 - \dot{y}_4)^2; \quad (8)$$

$$J_{01} = J_1 c_1^2 + J_2 c_2^2 l_1^2; \quad (9)$$

$$J_{02} = J_2 c_2^2 + J_1 c_1^2 l_1^2. \quad (10)$$

Потенциальная энергия в этом случае определяется выражением

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 (y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_3 (y_3 - z_2)^2 + \frac{1}{2} k_4 (y_4 - z_3)^2. \quad (11)$$

Используем технологию получения математических моделей в виде системы уравнений в операторной форме [14, 15], тогда:

$$a_{11} \bar{y}_1 + a_{12} \bar{y}_2 + a_{13} \bar{y}_3 = \bar{Q}_1; \quad (12)$$

$$a_{21} \bar{y}_1 + a_{22} \bar{y}_2 + a_{23} \bar{y}_3 = \bar{Q}_2; \quad (13)$$

$$a_{31} \bar{y}_1 + a_{32} \bar{y}_2 + a_{33} \bar{y}_3 = \bar{Q}_3. \quad (14)$$

В уравнениях (12)–(14) принято, что  $p = j\omega$  является комплексной переменной, значок  $\leftrightarrow$  над переменной означает ее изображение по Лапласу [14]. Коэффициенты уравнений (12)–(14) в детализированной форме приведены в табл. 2.

Сравнение табл. 1 и 2 показывает, что введение шарнира (при  $k_2 \rightarrow \infty$ ) приводит к упрощению системы, если иметь в виду ее структуру. Вместе с тем существенно изменяется физическая картина взаимодействия элементов. В частности, целесообразно отметить новые формы взаимодействия в организации вращательных движений твердых тел (угловые колебания).

Сопоставление результатов формирования математических моделей позволяет сделать некоторые выводы о возможностях существенного влияния на динамические свойства механических колебательных систем через межпарциальные связи, структура которых при определенном выборе параметров способна изменять процессы перекачки энергии между парциальными системами.

В реализации таких подходов важным является определение параметров расположения центра масс взаимодействующих твердых тел и их моментов инерции. При транспортных перевозках загрузка грузовых вагонов во многих случаях не ориентирована на сохранение свойств, имеющих значение для снижения уровня динамических взаимодействий при движении по изношенным рельсовым путям.

К числу таких параметров относятся значения момента инерции груженого вагона и расположение центра масс. Эти параметры известны для порожних вагонов, однако в случае загрузки отклонения могут быть достаточно значительными, и их нужно учитывать при реализации мер по обеспечению надежности и безопасности эксплуатации подвижного состава.

Таблица 2

Коэффициенты системы уравнений (12)–(14)

$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$
$(M_1 a_1^2 + J_{01}) p^2 + k_1$	$-(J_{01} - M_1 a_1 b_1) p^2$	0
$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$
$-(J_{01} - M_1 a_1 b_1) p^2$	$(M_1 b_1^2 + M_2 a_2^2 + J_{01} + J_{02}) p^2 + k_2$	$-(J_{02} - M_2 a_2 b_2) p^2$
$a_{31}$	$a_{32}$	$a_{33}$
0	$-(J_{02} - M_2 a_2 b_2) p^2$	$(M_2 a_2^2 + J_{02}) p^2 + k_4$
$a_{41}$	$a_{42}$	$a_{43}$
0	0	$-(J_2 c_2^2 - M_2 a_2 b_2) p^2$
Обобщенные силы		
$\bar{Q}_1 = k_1 \bar{z}_1$	$\bar{Q}_2 = k_3 \bar{z}_2$	$\bar{Q}_3 = k_4 \bar{z}_3$

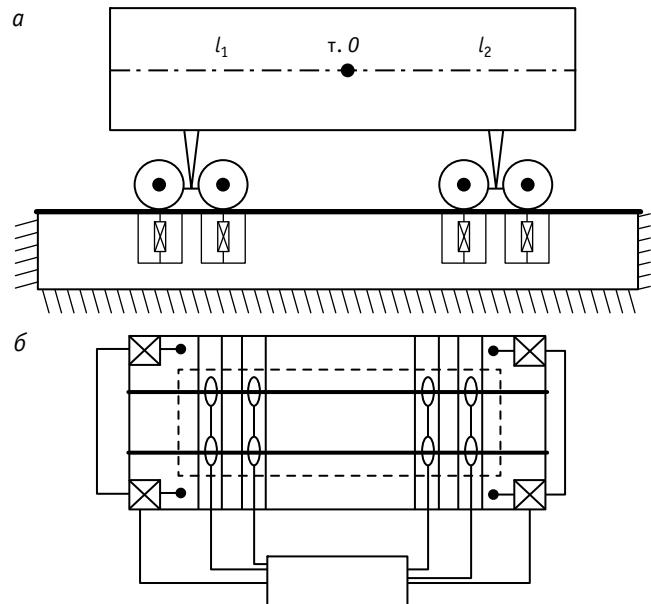


Рис. 2. Принципиальная схема измерительной площадки, принципы размещения объекта и измерительной аппаратуры:  
а — вид сбоку; б — вид сверху

Из результатов предыдущих исследований следует, что при определенных условиях в колебательных структурах, которые можно выделить в расчетной схеме выгона или сцепки двух вагонов, представляемой механической колебательной системой, возможны реализации режимов, при которых колебательные движения по одной координате не влияют на колебательные движения по второй координате. Эти условия достаточно наглядно определяются для систем с четырьмя и тремя степенями свободы (см. табл. 1 и 2).

Необходимые параметры для определения центра масс можно проиллюстрировать на примере рис. 2, на котором представлена схема груженого вагона, размещенного на специальной измерительной площадке.

На рис. 2 показана принципиальная схема оборудования системы оценки и контроля соответствующих параметров. Для определения требуемых геометрических параметров необходимо использовать специальную площадку с набором средств контактной (тензометры) и дистанционной контрольно-измерительной техники. На рис. 2а изображена схема расположения объекта и средств измерения, на рис. 2б показан вид сверху, что дает представление о возможности измерений при движении вагона.

Основа метода построена на следующих представлениях: сумма усилий, приходящихся на каждую из осей рельсовой пары с обеих сторон, соответствует в первом приближении нагрузке, приходящейся на один конец вагона (реакция  $R_1$ ); аналогично может быть найдена и вторая реакция ( $R_2$ ).

Обозначим вес вагона как  $P = mg$ . Если центр тяжести лежит между реакциями  $R_1$  и  $R_2$  и определяется длинами  $l_1$  и  $l_2$ , то при  $l_1 + l_2 = L$ , где  $L$  — длина вагона (точнее, расстояние между шкворнями вагонных тележек):

$$l_1 = \frac{R_1}{P} (l_1 + l_2); \quad (15)$$

$$l_2 = \frac{R_2}{P} (l_1 + l_2); \quad (16)$$

$$P = R_1 + R_2. \quad (17)$$

Полученные данные могут быть использованы для прогнозных оценок динамических состояний вагонов при действии вибрационных возмущений со стороны рельсового пути и возможностей динамических взаимодействий при оценке вагонов, поскольку несимметричные нагрузки на вагонные тележки существенно влияют на динамическое состояние грузовых вагонов.

Принципиальная схема расчетов (распределения силовых факторов) представлена на рис. 3, где  $l_1$  и  $l_2$  показывают расположение центра тяжести груженого вагона. Предполагается, что центр тяжести находится в середине вагона (силы реакции  $R_1 = R_2$ ).

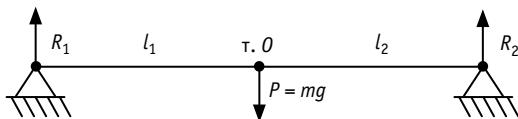


Рис. 3. Расчетная схема для определения параметров расположения центра масс груженого вагона

Таким образом, определение массоинерционных параметров грузового вагона и устройство для его реализации могут быть использованы для решения задач, направленных на повышение надежности и безопасности перевозочных процессов, осуществляемых техническими средствами железнодорожного транспорта.

Предлагаемые подходы связаны с детализацией представлений о возможностях определения расположения центра масс груженого вагона в процессе его движения в зоне сортировочных перемещений. Они основаны на создании измерительного узла для автоматической оценки расположения центра тяже-

сти, представляющего собой врезку в рельсовый путь бетонной площадки, равной длине вагона. Эта бетонная поверхность выполнена в виде железобетонного параллелепипеда. На ней расположены четыре канавки с поперечным сечением 500×500 мм с установленными в углублениях тензометрическими датчиками, над которыми располагаются опирающиеся части рельса. Датчики позволяют измерять давление колесных пар на свободные участки рельсовых путей в восьми точках (контакт «колесо — рельс»), их показания автоматически записываются и после расшифровки дают необходимые данные о положении центра тяжести (центра масс) груженого вагона.

Реализация предлагаемого подхода в оценке массоинерционных параметров груженого вагона состоит из системы фиксации необходимого положения вагона при прохождении точек контакта «колесо — рельс» соответствующей позиции совпадения этих точек с точками нахождения тензометрических датчиков. Это достигается срабатыванием светодиодной системы, фиксирующей положение движущегося вагона в момент необходимого положения, когда точки контакта «колесо — рельс» совпадают с точками крепления тензометрических датчиков в точках прогиба рельсов в зонах «провисания». Светодиодные системы обеспечивают включение записи данных восемью тензометрическими датчиками, обработку данных и формирование необходимого файла.

Использование предлагаемых подходов для предварительной оценки массоинерционных параметров дает возможность снизить риски возникновения динамических «всплесков» взаимодействия вагонов в условиях движения с повышенными нагрузками на ось при увеличении скоростей.

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ГРУЖЕНОГО ВАГОНА

Учитывая данные, рассмотренные в предыдущих разделах, отметим, что режимы развязки взаимодействия колебательных систем между парциальными блоками упругих структур зависят также от величины момента инерции груженого вагона.

Определение моментов инерции груженых вагонов требует разработки и создания таких измерительных систем, которые при выполнении соответствующих условий и установке специальной измерительной аппаратуры позволяют получать необходимую информацию без остановки вагона на сортировочной горке. Принципиальная схема подобной контрольно-измерительной системы представлена на рис. 4.

Идея построения такого блока связана с созданием площадки на бетонном основании и возбуждением колебаний груженого вагона при наезде на «специальные неровности рельсов». При соответствующей измерительной базе могут быть установлены датчики контактного и дистанционного действия.

Расчетными схемами многих технических объектов, в том числе средств подвижного состава железных дорог, являются механические колебательные системы с несколькими степенями свободы.

Динамика взаимодействия технических средств (например, грузовых поездов) отличается большим разнообразием динамического взаимодействия элементов системы, что требует учета специфических особенностей технических объек-

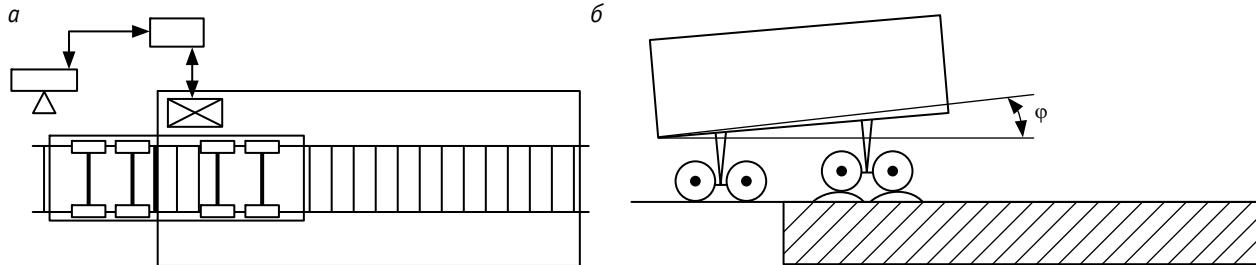


Рис. 4. Принципиальная схема контрольно-измерительной площадки для определения момента инерции груженого вагона:  
а — вид сверху; б — вид сбоку

тов, оценки значений массоинерционных параметров, критических значений внешних воздействий и др.

Рассмотрим построение математических моделей оценки динамических свойств груженых вагонов для определения особенностей соотношения таких параметров системы, как положение центра масс, значение момента инерции и др.

Расчетная схема вагона, принципиальная схема которого изображена на рис. 4, может быть представлена в виде механической колебательной системы с двумя степенями свободы (рис. 5).

Технический объект в первом приближении представляет собой твердое тело, обладающее массой  $M$  и моментом инерции  $J$  относительно центра масс (точка  $O$  на рис. 5). Система опирается на два упругих элемента с коэффициентами  $k_1$  и  $k_2$ , положение центра масс определяется длинами  $l_1$  и  $l_2$ .

Предполагается, что твердое тело ( $M, J$ ) совершает малые колебания относительно положения установленного движения в системе координат  $y_1, y_2$ , связанной с неподвижным базисом. Система имеет внешнее кинематическое возмущение  $z_2(t)$ , представленное гармонической функцией.

Математическая модель исходной системы (рис. 6) может быть рассмотрена на основе методов структурного математического моделирования [8, 12], что определяется следующими уравнениями:

$$\bar{y}_1 [(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1] - \bar{y}_2 (Jc^2 - Mab)p^2 = 0; \quad (18)$$

$$\bar{y}_2 [(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2] - \bar{y}_1 (Jc^2 - Mab)p^2 = k_2 \bar{z}_2, \quad (19)$$

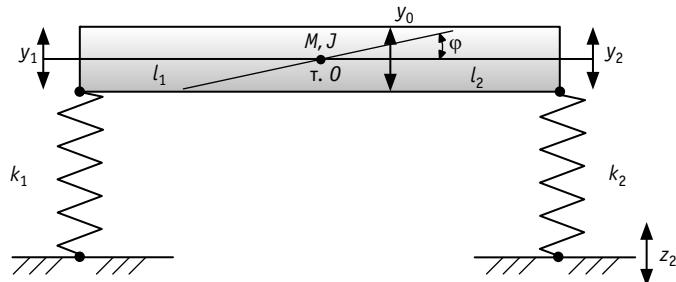


Рис. 5. Расчетная схема груженого вагона

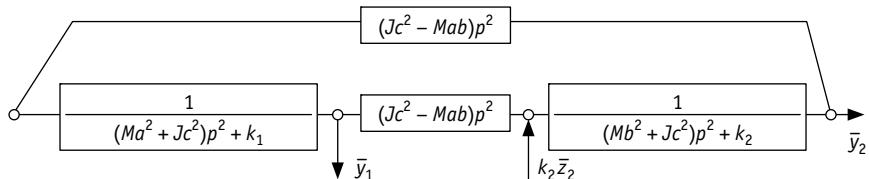


Рис. 6. Структурная схема (структурная математическая модель) груженого вагона

где  $p = j\omega (j = \sqrt{-1})$  — комплексная переменная;

значок  $\leftrightarrow$  над переменной означает ее изображение по Лапласу [14, 15].

С использованием уравнений (1), (2) в операторной форме можно ввести в рассмотрение структурную математическую модель в виде структурной схемы (см. рис. 6) эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления [8, 12].

Используя структурную схему, представленную на рис. 6, запишем передаточные функции системы:

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{z}_2} = \frac{k_2(Jc^2 - Mab)p^2}{A(p)}; \quad (20)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{z}_2} = \frac{k_2[(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1]}{A(p)}, \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{где } A(p) = & [(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1] \times \\ & \times [(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2] - \\ & - [(Jc^2 - Mab)p^2]^2. \end{aligned} \quad (22)$$

Выражение (22) является частотным характеристическим уравнением, где

$$a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}, \quad b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}, \quad c = \frac{1}{l_1 + l_2}. \quad (23)$$

Полагая, что положение центра масс известно, найдем значение момента инерции  $J$ . Вопрос об оценке значения  $J$  возникает при формировании загрузки грузового вагона. Что касается значения массы  $M$ , а также значений коэффициентов  $a$  и  $b$ , то полагаем, что они также известны (либо при расчетах расположения грузов, либо путем определения  $M, a$  и  $b$  в процессе загрузки или на специальном стенде перед формированием состава).

Определение параметра  $J$  представляет интерес, поскольку при выполнении условия

$$(Jc^2 - Mab)p^2 = 0 \quad (24)$$

«исчезает» инерционная связь между парциальными системами (см. рис. 6), что существенным образом оказывает влияние на процессы динамики взаимодействий:

$$\begin{aligned} i = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} &= \frac{[(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1]}{(Jc^2 - Mab)p^2}; \\ i(Jc^2 - Mab)p^2 &= (Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1; \quad (25) \\ (iJc^2 - iMab - Ma^2 - Jc^2)p^2 &= k_1. \end{aligned}$$

Так как  $i$  определяется экспериментально, можно найти частоту колебаний «галопирования»:

$$(iJc^2 - iMab - Ma^2 - Jc^2)p^2 = \frac{-k_1}{Jc^2(i-1) - Ma(a+bi)}.$$

Масса известна из предыдущих экспериментов.

Используя подходы, изложенные в работах [12, 14], запишем передаточную функцию межпарциальных связей, учитывая особенности структурной математической модели, представленной на рис. 6:

$$W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{[(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1]}{(Jc^2 - Mab)p^2}. \quad (26)$$

Физический смысл передаточной функции  $W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}$  заключается в том, что она отображает зависимость отношения амплитуд колебаний двух точек твердого тела. В ряде работ, в том числе в [14], отношение амплитуд (8) интерпретируется как передаточное отношение

$$i = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} \quad (27)$$

некоторого виртуального рычага (рычажного механизма первого или второго рода в зависимости от знака  $i$ ), значение которого зависит от параметров элементов системы и частоты колебаний механической колебательной системы.

Так как значение  $i$  может быть определено в рассматриваемом случае не на основе экспериментальных данных, это позволяет найти частоту угловых колебаний

$$[(Jc^2(i-1) - Ma(a+bi))p^2 = k_1]. \quad (28)$$

Отсюда следует, что

$$p^2 = \frac{k_1}{[(Jc^2(i-1) - Ma(a+bi))]} - \omega^2 = \frac{k_1}{-[(Jc^2(i-1) + Ma(a+bi))]}.$$

или

$$\omega^2 = \frac{k_1}{[(Jc^2(i-1) + Ma(a+bi))]} \quad (29)$$

Поскольку  $i$  может быть определено экспериментом, то, как следует из (29),

$$\omega^2 Jc^2(i-1) \omega^2 - \omega^2 Ma(a+bi) = k_1. \quad (30)$$

Значит,

$$J = \frac{k_1 - \omega^2 Ma(a+bi)}{c^2(i-1)}. \quad (31)$$

Из выражения (31) можно найти значение момента инерции груженого вагона  $J$ . При этом необходимо учитывать, что определяемый параметр  $i$  в силу специфики движений имеет отрицательное значение. Тогда окончательно получаем

$$J = \frac{k_1 + \omega^2 Ma(a-bi)}{c^2(i-1)}. \quad (32)$$

На основании приведенных выкладок, используя полученные данные экспериментальных замеров ( $i$  и  $b$ ), можем найти значение момента инерции  $J$  груженого вагона и сопоставить его с условием, определяющим рациональные параметры движения вагонов при интенсивном динамическом нагружении.

Развиваемый подход позволяет решать задачи определения параметров динамических состояний груженых вагонов в ситуациях, когда плановая загрузка отличается от нормативных условий. Это может привести к существенным отклонениям в размещении центра масс вагона и изменениям его момента инерции.

Методика реализуется за счет пропуска вагона при его движении в зоне сортировки на скорости свободного скатывания и прохода через измерительную систему. Эта система представляет собой специальную железобетонную платформу с проложенной по ней рельсовой нитью (имеющей специальную прокладку в зоне входа), при переезде через которую генерируется угловое колебание груженого вагона. Эти параметры регистрируются системой оценки перемещений специально выбранных точек вагонов (углы кузова грузовых вагонов). Измерения производятся при прохождении только одной синусоидальной наладки с фиксацией параметров вертикальных колебаний точек, связанных с углами платформы (или кузова вагона).

При помощи измерительной платформы с моделированием препятствия создаются кинематические возмущения неровностями в контакте «рельс — колесо» для первой вагонной двухосной тележки в отрезок времени, предшествующий заходу второй вагонной тележки на имитатор внешнего воздействия.

Измерительная система предполагает установку двух телекамер. Их включение и выключение обеспечивается двумя светодиодными блоками, прерывание луча которых создает необходимые условия для передачи информации о параметрах колебаний вагона в блок управления. Обработка данных предусматривает отправку поступающей информации на персональный компьютер, последующее создание и передачу фай-



ла параметров вагона в соответствующие системы управления формированием состава. При этом движение вагона обеспечивается в результате «накатывания» в зоне сортировки без использования специальных устройств осуществления движения под действием силы тяжести.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статья посвящена развитию научно-методологических основ, используемых в задачах динамики технических средств железнодорожного транспорта. Разработан метод построения математических моделей, отображающих изменения динамических состояний колебательных структур при помощи детализации представлений о возможностях межпарциальных связей в механических системах с несколькими степенями свободы.

1. Предложена методика построения математических моделей на основе методов структурного математического моделирования, в рамках которого механическая система интерпретируется как динамический аналог системы автоматического управления.

2. Показано, что в системах с объектами защиты в виде твердых тел, обладающих массой и моментом инерции, при определенных условиях возможно разделение системы на отдельные блоки, которые могут совершать вибрационные движения, создавая процессы взаимной перекачки энергии.

3. Установлено, что в системах с четырьмя степенями свободы, которые реализуются в упругих сцепках груженых вагонов, возможны ситуации разложения колебательных движений элементов на отдельные группы. Это достигается за счет выбора значений моментов инерции и параметров расположения центров масс вагонов. Момент инерции и положение центра масс зависят от параметров объектов, образующих определенные состояния.

4. Представлена концепция экспериментального определения момента инерции вагона и параметров размещения центра масс. Концепция может быть реализована путем построения специальных измерительных блоков, обеспечивающих изменение при движении вагонов с сортировочной горки. Предложены математические модели обработки информации.

5. Рассмотрены случаи влияния на спектр динамических свойств сцепки вагонов при увеличении жесткости сцепного устройства и приближении его свойств к свойствам шарнира. Предложена методика построения математических моделей в операторной форме.

6. Показано, что нормирование параметров, контролирующих положение центра масс и величину момента инерции, может создать запас надежности и безопасности эксплуатации вагонного парка при увеличении скоростей движения и росте вибрационных нагрузок.

## Литература

1. Лапидус Б. М. О формировании актуальных направлений фундаментальных научных исследований в интересах опережающего развития ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2019. № 6. С. 26–30. ISSN 0044–4448.
2. О научной поддержке стратегического планирования на железнодорожном транспорте: критерии безопасности и рисков / Н. А. Махутов, Б. М. Лапидус, М. М. Гаденин, Е. Ю. Титов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2015. № 4. С. 2–12. ISSN 2304–9642.
3. Черняк А. Р. Анализ причин несохранности грузов при транспортировке железнодорожным транспортом // Вестник современных исследований. 2018. № 12.10 (27). С. 399–405. ISSN 2541–8300.
4. Кузнецов В. Г., Федоров Е. А., Гедрис К. И. Оценка организации перемещения вагонов на инфраструктуре с применением процессно-объектного подхода // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2018. № 1 (36). С. 107–111. ISSN 2227–1120.
5. Маловецкая Е. В., Большаков Р. С. Особенности применения временных рядов для оценки колебаний вагонопотоков по стыковым пунктам железных дорог // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 1. С. 35–40. ISSN 2072–8743.
6. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. Москва : Транспорт, 1997. 326 с.
7. Вершинский С. В., Данилов В. И., Хусидов В. Д. Динамика вагона / Под ред. С. В. Вершинского ; 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1991. 360 с.
8. Хохлов А. А. Динамика сложных механических систем. Москва : МИИТ, 2002. 172 с.

## References

1. Lapidus B. M. On the formation of topical areas of fundamental scientific research in the interests of the advanced development of Russian Railways [O formirovanií aktual'nykh napravlenii fundamental'nykh nauchnykh issledovanii v interesakh operezhayushhego razvitiya OAO «RZhD»] // Railway Transport. 2019. No. 6. Pp. 26–30. ISSN 0044–4448.
2. Scientific support of strategic planning on railway transport: criteria of security and risks [O nauchnoy podderzhke strategicheskogo planirovaniya na zheleznodorozhnom transporte: kriterii bezopasnosti i riskov] / N. A. Makhutov, B. M. Lapidus, M. M. Gadenin, E. Yu. Titov // Bulletin of Joint Scientific Council of JSC Russian Railways. 2015. No. 4. Pp. 2–12. ISSN 2304–9642.
3. Chernyak A. R. Analysis of the reasons for non-safety of goods during transportation by rail [Analiz prichin nesokhrannosti gruzov pri transportirovke zheleznodorozhnym transportom] // Bulletin of Modern Researches. 2018. No. 12.10 (27). Pp. 399–405. ISSN 2541–8300.
4. Kuznetsov V. G., Fedorov E. A., Gedris K. I. Assessment of the organization of wagons displacement on infrastructure with application of process-object approach [Otsenka organizatsii peremeshcheniya vagonov na infrastrukture s primeneniem protsessno-ob'ektnogo podkhoda] // Bulletin of BSUT: science and transport. 2018. No. 1 (36). Pp. 107–111. ISSN 2227–1120.
5. Malovetskaya E. V., Bolshakov R. S. Features of time series using for estimation of fluctuations of car traffic volumes at the railway division points [Osnobennosty primeneniya vremennykh ryadov dlya otseki kolebaniy vagonopotokov po stykovym punktam zheleznykh dorog] // T-Comm: Telecommunications and Transport. 2021. Vol. 15. No. 1. Pp. 35–40. ISSN 2072–8743.
6. Kogan A. Ya. Track dynamics and its interaction with rolling stock [Dinamika puti i ego vzaimodeystvie s podvizhnym sostavom]. Moscow : Transport, 1997. 326 p.
7. Vershinskiy S. V., Danilov V. I., Khusidov V. D. Dynamics of the car [Dinamika vagona] / Ed. by S. V. Vershinskiy ; 3rd edition, revised and expanded. Moscow : Transport. 1991. 360 p.
8. Khokhlov A. A. Dynamics of complex mechanical systems [Dinamika slozhnykh mekhanicheskikh sistem]. Moscow : MIIT, 2002. 172 p.

9. Методология системного анализа в задачах оценки, формирования и управления динамическим состоянием технологических и транспортных машин / С. В. Елисеев, А. В. Елисеев, Р. С. Большаков, А. П. Хоменко. Новосибирск : Наука, 2021. 681 с.
10. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава / Под ред. М. Ф. Вериго. Москва : Транспорт, 1986. 559 с.
11. Ромен Ю. С. Математическое моделирование при исследовании взаимодействия экипажа и пути // Железнодорожный транспорт. 2017. № 11. С. 62–64. ISSN 0044-4448.
12. Туранов Х. Т. Теоретическая механика в специальных задачах грузовых перевозок. Новосибирск : Наука, 2012. 447 с.
13. Чунин С. В., Шабуневич В. И., Савосыкин А. Н. Экспериментальное исследование собственных частот и форм колебаний рельса // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 3. С. 154–160. ISSN 2223–9731.
14. Елисеев С. В. Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование (динамика транспортных технологических машин: связность движений, вибрационные взаимодействия, рычажные связи). Иркутск : ИрГУПС, 2018. 692 с.
15. Лурье А. И. Операционное исчисление и применение в технических приложениях. Москва ; Ленинград : ГИТЛ, 1961. 433 с.
9. Methodology of systems analysis in the tasks of assessing, forming and managing the dynamic state of technological and transport machines [Metodologiya sistemnogo analiza v zadachakh otsenki, formirovaniya i upravleniya dinamicheskim sostoyaniem tekhnologicheskikh i transportnykh mashin] / S. V. Eliseev, A. V. Eliseev, R. S. Bolshakov, A. P. Khomenko. Novosibirsk : Science, 2021. 681 p.
10. Verigo M. F., Kogan A. Ya. Reacting of the way and the rolling equipment [Vzaimodeystvie puti i podvzhnogo sostava] / Ed. by M. F. Verigo. Moscow : Transport, 1986. 559 p.
11. Romen Yu. S. Mathematical modeling in the study of the interaction of the crew and the track [Matematicheskoe modelirovaniye pri issledovanii vzaimodeystviya ekipazha i puti] // Railway Transport. 2017. No. 11. Pp. 62–64. ISSN 0044-4448.
12. Turanov Kh. T. Theoretical mechanics in special freight transport problems [Teoreticheskaya mekhanika v spetsial'nykh zadachakh gruzovykh perevozok]. Novosibirsk : Science, 2012. 447 p.
13. Chunin S. V., Shabunovich V. I., Savoskin A. N. Experimental study of natural frequencies and forms of the rail oscillations [Eksperimental'noe issledovanie sobstvennykh chastot i form kolebaniy rel'sa] // VNIIZhT Scientific Journal. 2020. Vol. 79. No. 3. Pp. 154–160. ISSN 2223–9731.
14. Eliseev S. V. Applied system analysis and structural mathematical modeling (dynamics of transport and technological machines: movements connectivity, vibration interactions, lever ties) [Prikladnoy sistemnyy analiz i strukturnoe matematicheskoe modelirovaniye (dinamika transportnykh i tekhnologicheskikh mashin: svyaznost' dvizheniy, vibratsionnye vzaimodeystviya, rychazhnye svyazi)]. Irkutsk : ISTU, 2018. 692 p.
15. Lurye A. I. Operational calculus and application in technical applications [Operatsionnoe ischislenie i primenenie v tekhnicheskikh prilozheniyakh]. Moscow ; Leningrad, 1961. 433 p.

Объем статьи 0,97 авторских листа

УДК 629.463

Вадим Борисович Свердлов, кандидат технических наук, инспектор по сохранности вагонного парка службы вагонного хозяйства Свердловской дирекции инфраструктуры, Екатеринбург, Россия,  
 Василий Федорович Лапшин, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны»  
 Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОХРАННОСТИ ВАГОННОГО ПАРКА НА ПУТЯХ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Vadim Borisovich Sverdlov, PhD in Engineering, Inspector for safety of car fleet, Car Service Division, Sverdlovsk Infrastructure Directorate, Ekaterinburg, Russia,  
 Vasiliy Fedorovich Lapshin, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Car fleet safety assurance on non-public railway tracks

#### Аннотация

В статье рассмотрены проблемы, связанные с обеспечением сохранности вагонного парка, выделены аспекты, требующие научного решения. Особое внимание уделено оценке влияния структурной реформы железнодорожного транспорта на динамику роста повреждаемости грузовых вагонов. Показано, что наибольшее количество повреждений приходится на грузовую и маневровую работу на путях необщего пользования, а технологический уровень организаций и проведения грузовых операций на промышленных предприятиях не может гарантировать исключение рисков повреждения вагонов.

На примере разгрузки полуавтоматов с применением накладных вибромашин рассмотрены аспекты обеспечения сохранности, требующие научного обоснования. Выделены первоочередные задачи, которые необходимо решать: пересмотр действующей нормативно-технической документации по обеспечению сохранности грузовых вагонов, упорядочивание взаимоотношений между собственниками вагонов, владельцем инфраструктуры и владельцами путей необщего пользования, разработка методологических основ организации системы обеспечения сохранности вагонного парка.

**Ключевые слова:** вагонный парк, сохранность, путь необщего пользования, средство разгрузки, риск повреждения, полуавтомат, параметры разгрузки, мониторинг, система обеспечения сохранности.

#### Summary

The paper considers problems connected with car fleet safety assurance, it highlights aspects that require a scientific solution. Special attention is paid to assessment of influence of railway transport structural reform on dynamics of damage growth of freight cars. The paper shows that the greatest amount of damage occurs during freight and shunting operation on non-public railway tracks while a technological level of organization and execution of freight operations on industrial enterprises can't guarantee an exception of car damage risks.

On the example of open-box cars unloading with the use of overhead vibration machines the authors have considered aspects of safety assurance that require a scientific justification. They have highlighted priority tasks that it is necessary to solve: revision of normative and technical documentation on freight car safety assurance, arrangement of interaction between car owners, a railway infrastructure owner and owners of non-public railway tracks, development of methodological basics for organization of car fleet safety assurance system.

**Keywords:** car fleet, safety, non-public railway track, unloading facility, risk of damage, open-box car, unloading parameters, monitoring, safety assurance system.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-33-39

#### ВВЕДЕНИЕ

Сохранность вагонного парка имеет важное значение для обеспечения потребности хозяйствующих субъектов в перевозках, предотвращения потерь грузов, обеспечения безопасности движения поездов и сокращения расходов на ремонт вагонов [1, 2]. Анализ литературных источников [2–11] свидетельствует, что за последние 40 лет, несмотря на принимаемые меры, проблема сохранности вагонного парка остается на железнодорожном транспорте одной из самых важных.

Проводимые в течение 20 лет структурные преобразования в отрасли добавили еще ряд вопросов, осложняющих решение проблемы сохранности: массовое разборование вагонов и хищение узлов и деталей [9], несовершенство нормативной и правовой базы, определяющей взаимоотношения между собственником вагонов, владельцем инфраструктуры и владельцем путей необщего пользования [7, 9, 10], появление новых инновационных вагонов, а также новых средств для погрузки-выгрузки грузов [6, 11, 12].

Представленная статья не претендует на полноту изложения всех проблем, связанных с обеспечением сохранности вагонного парка, носит обзорный характер и ставит цель выделить аспекты, требующие научного решения.

33

Октябрь – Декабрь

## ПОЛОЖЕНИЕ С СОХРАННОСТЬЮ ВАГОННОГО ПАРКА В УСЛОВИЯХ СТРУКТУРНОЙ РЕФОРМЫ

Общую тенденцию с сохранностью вагонного парка в условиях структурной реформы железнодорожного транспорта показывает динамика роста повреждаемости грузовых вагонов. Так, по данным управления вагонного хозяйства ОАО «РЖД» [9], если в 2005 г. на сети железных дорог было повреждено 17155 вагонов, в 2007-м — 43500, в 2010-м — 57806, то в 2013-м — уже 118380. В настоящее время ситуация стабилизировалась на уровне 90–100 тыс. вагонов [13].

Как показал анализ формы В0-15, за 12 месяцев 2020 г. [13] наибольшее количество поврежденных вагонов выявлено при грузовой работе на путях необщего пользования (табл. 1).

Наиболее массовые повреждения имеют полувагоны — 78373 ед. подвижного состава (90,8 % от общего количества поврежденных вагонов). Максимум приходится на зимние месяцы, когда насыпные грузы (уголь, руда и др.) поступают под выгрузку в смерзшемся состоянии. Основные причины повреждений [3–5] — применение для погрузки и выгрузки неисправных машин и механизмов, использование грейферного метода разгрузки, нарушение технических условий размещения и крепления грузов и правил производства операций, неудовлетворительное состояние путей необщего пользования. Традиционно наибольшее количество поврежденных вагонов выявляется на железных дорогах, обслуживающих пути необщего пользования морских портов [9, 10, 13].

Однако общая тенденция прослеживается и на дорогах, не имеющих выхода к морским портам (или имеющих ограниченный выход). В качестве примера рассмотрим юрисдикцию Свердловской железной дороги, где за 12 месяцев 2020 г. на путях необщего пользования повреждено 454 полувагона (60 % от общего количества поврежденных вагонов на дороге). За 2017–2020 гг. в результате предпринятых мер [14, 15] положение с сохранностью вагонного парка на дороге стабилизировалось (табл. 2). Наибольшее количество поврежденных вагонов приходится на грузовую (в среднем около 70 %) и маневровую (в среднем около 19 %) работу на путях необщего пользования.

Основная причина большого количества поврежденных полувагонов — результат их взаимодействия с техническими средствами погрузки-выгрузки: канатными грейферами, вагоноопрокидывателями, виброрыхлителями, тепляками и прочими устройствами. На железных дорогах, обслуживающих морские и речные порты, это применение грейферной технологии выгрузки угля из полувагонов [9, 11, 16].

Не являются исключением и другие регионы, где на путях необщего пользования применяются различные технические средства разгрузки. Так, только на предприятиях, обслуживаемых Свердловской железной дорогой, эксплуатируется 217 технических средств (табл. 3), более 60 % которых применяются для разгрузки полувагонов.

В целом по России наибольшая доля повреждений вагонов по состоянию на 2020 г. приходится на кузова — свыше 50 % (рис. 1) [13].

В технологическом плане самая повреждающая разгрузочная операция — грейферная разгрузка. Удары грейфером по

Таблица 1

Распределение поврежденных вагонов по роду вагонов на путях необщего пользования за 12 месяцев 2020 г.

Род вагонов	При грузовой работе	При маневровой работе
Крытые	916/31	96/8
Платформы	2620/197	153/10
Полувагоны	78373/454	742/126
Цистерны	193/11	122/25
Хопперы	1199/43	152/42

Примечание. В числителе — данные по России, в знаменателе — по Свердловской железной дороге.

Таблица 2

Результаты анализа формы В0-15 по Свердловской железной дороге за 2017–2021 гг.

Год	Грузовая работа	Маневровая работа	Поездная работа
2017	726/0	253/42	-/33
2018	715/26	215/17	-/85
2019	829/76	150/17	-/55
2020	755/2	212/29	-/6
2021 (апрель)	247/4	70/24	-/10

Примечание. В числителе — на путях необщего пользования, в знаменателе — на путях общего пользования.

Таблица 3

Технические средства взаимодействия с вагоном на территории Свердловской железной дороги по состоянию на 2020 г.

Техническое средство	Количество предприятий, использующих данное техническое средство
Тепляки	42
Вибробуровыххлительные установки	76
Вагоноопрокидыватели	14
Пароустановки	85

верхней обвязке, настилу пола из люков, стойкам неизбежно приводят к повреждениям вагона. Отрывы листов обшивки от стоек, трещины в сварных швах, повреждения стоек боковой стены характерны для разгрузки с применением вибромашин. Виброразгрузка негативно сказывается на техническом состоянии автотормозного оборудования, приводя к нарушению плотности тормозной магистрали и обрывам ее подводящих трубок. В ряде случаев повреждения не требуют отцепки, но ослабляют конструкцию и обязательны к устраниению при плановых видах ремонта.

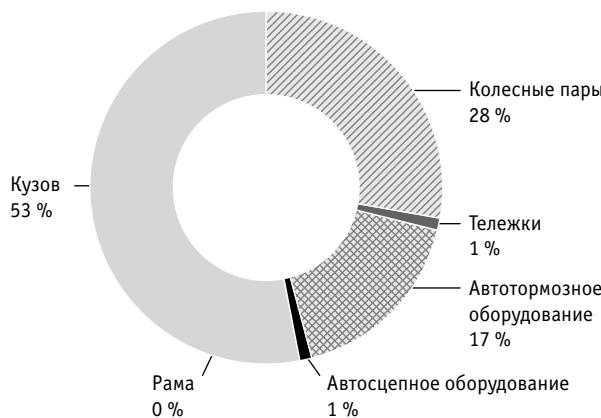


Рис. 1. Количество поврежденных узлов за 12 месяцев 2020 г.

Как видно из краткого анализа, в настоящее время технический и технологический уровень организации и выполнения грузовых операций на промышленных предприятиях не может гарантировать исключение рисков повреждения грузовых вагонов. Планируемые на дорогах проверки по обеспечению сохранности вагонного парка, механизмов, взаимодействующих с вагоном, выполнению требований ГОСТ 22235–2010 [17], технических условий погрузки-выгрузки в большинстве своем зависят от согласия и «доброй воли» собственников промышленных предприятий и владельцев путей необщего пользования.

Единственным и наиболее действенным способом предотвращения приема на инфраструктуру поврежденных вагонов с путей необщего пользования остается контроль вагонов на пунктах технической передачи [14, 15]. Однако принимаемые меры носят характер постфакту и не направлены на предупреждение повреждений вагонов при разгрузочных операциях.

#### НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОХРАННОСТИ, ТРЕБУЮЩИЕ НАУЧНОГО ОБОСНОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ РАЗГРУЗКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАКЛАДНЫХ ВИБРОМАШИН)

В настоящее время в отрасли сложилась парадоксальная ситуация, когда требования к изготовлению новых вагонов, эксплуатации железнодорожного подвижного состава регулируются техническим регламентом [18] и ПТЭ [19], а требования по обеспечению сохранности вагонов являются необязательными для исполнения, поскольку ГОСТ 22235–2010 [17], определяющий такие требования, носит добровольный характер.

Более того, отдельные положения ГОСТа не соответствуют текущему моменту. Рассмотрим один из примеров. Согласно п. 5.5.1, «...не допускается использование накладных вибрационных устройств для полувагонов с высотой боковых стен более 2065 мм». Это требование введено в ГОСТ 22235 в 2010 г., основанием послужил комплекс исследований, проведенных УО ВНИИЖТ совместно с УрГУПС в период с 2002 по 2008 г. [6, 20]. Такое решение было принято по результатам подконтрольной эксплуатации полувагонов модели 12–132, имеющих высоту кузова 2365 мм и боковые стены с периодически повторяющимися гофрами глубиной 36 мм (табл. 4). При воздействии на кладных вибромашин на кузов «более 90 % полувагонов име-

ли отрывы листов обшивки от стоек боковой стены и трещины до 200 мм в углах верхнего и среднего гофров первой и второй панелей» [21]. Однако обратимся к графе 3 табл. 4 (данные с официальных сайтов производителей), из которой видно, что все выпускаемые в настоящее время модели полувагонов имеют высоту более 2065 мм. Встает вопрос, что делать и как обеспечить требование ГОСТ в данной ситуации.

Для исключения повреждений и обеспечения сохранности все производители перешли на выпуск моделей полувагонов с обшивкой боковых стен из гладкого листа с продольными сквозными гофрами глубиной 10 мм (см. табл. 4, гр. 4).

В результате моделирования нагруженности полувагонов установлено, что «переход на профили обшивки из гладких листов и с продольными сквозными гофрами обеспечивает снижение уровня напряжений в углах гофров на 20 %, а в зонах приварки к стойкам — на 35 %. Отказ от профилей с периодическими гофрами позволяет исключить зависание груза в гофрах и практически обеспечить возможность использования вибротехники при разгрузочных операциях в течение всего межремонтного периода» [22, 23].

Однако это заключение не может однозначно снять ограничение на использование накладных вибромашин при разгрузке полувагонов с высотой кузова более 2065 мм, поскольку моделирование выполнялось только для моделей 12-132-03 и 12-196-01. Для указанных моделей в руководстве по эксплуатации ограничено время очистки «при помощи вибрационных машин суммарной продолжительностью более 7 мин за одну разгрузку и более 490 мин в период эксплуатации между плановыми видами ремонта» [24], для полувагонов 132-го модельного ряда — 168 мин [25].

Еще сложнее обстоит дело с продукцией Тихвинского вагоностроительного завода, где, с одной стороны, модели вагонов не имеют аналогов в отечественной эксплуатации (например, шестиосный полувагон сочлененного типа модели 12-6877-02 [26]), а с другой — руководство по эксплуатации ограничивается стандартной формулировкой «погрузку и выгрузку вагонов производить с применением специализированных машин различных типов без повреждения конструкции вагона в соответствии с требованиями ГОСТ 22235» [26].

Таким образом, решение проблемы сохранности вагонов на путях необщего пользования требует в первую очередь пересмотра действующей нормативно-технической документации и установления требований, соответствующих техническому и технологическому уровню погрузочно-разгрузочных операций.

Рассмотрим еще один аспект обеспечения сохранности вагонного парка на путях необщего пользования, вытекающий из вышеизложенного. Современный этап эксплуатации полувагонов характеризуется увеличением интенсивности подачи под виброразгрузку до 16 раз в месяц [6, 20, 21]. Следовательно, при соблюдении требования ГОСТ 22235 по продолжительности одной разгрузки не более 7 мин суммарное время нахождения полувагона под виброразгрузкой в течение только одного года составит свыше 1300 мин. Более того, использование виброразгрузочных комплексов сопровождается целым рядом несоответствий положениям ГОСТ 22235: не учитывается

Таблица 4

Характеристика полувагонов, выпускаемых отечественными вагоностроительными заводами в 2021 г.

Завод-изготовитель	Модель	Высота кузова (внутренний размер), мм	Фото
1	2	3	4
АО «Тихвинский вагоностроительный завод»	12-9853	2398	
	12-9869	2561	
АО «НПК «Уралвагонзавод»	12-132 (начало производства 1992 г.)	2365	
	12-132-02	2365	
	12-196-04	2436	
	12-5190	2530	
АО «Алтайвагон»	12-296-01	2250	

время нагружения, не соблюдается место приложения вибрации, не контролируются параметры вынужденных колебаний (амплитуда силы, частота колебаний), на предприятиях применяются вибромашины собственного изготовления с не нормированными линейными размерами и техническими характеристиками [7, 10, 27].

Отсюда возникает вопрос, кто, как и где учитывает время нахождения вагонов под разгрузкой с применением виброустройств и контролирует параметры разгрузочных машин и механизмов. Ответом на этот вопрос мог бы стать непосредственный контроль за процессом разгрузки полуваагонов с использованием автоматизированных систем управления разгрузочными операциями.

В соответствии с мировыми тенденциями применения различных цифровых технологий в числе приоритетных направлений развития транспортного машиностроения России предусмотрено внедрение интеллектуальных систем при эксплуатации грузового подвижного состава (умный вагон) [28]. Несмотря на все трудности практической реализации (использование датчиков на сети GSM/LTE), в настоящее время сформировано понимание умного вагона, возможности которого распространяются также и на контроль за соблюдением условий эксплуатации вагона [29].

Применимую к рассматриваемой задаче виброразгрузки более перспективна стационарная система, которая автоматически проводила бы мониторинг на отдельно взятых пунктах разгрузки вагонов [27, 30]. В основу автоматизированной системы управления виброразгрузкой (АС) необходимо заложить следующие принципы [27]:

использование существующей вагонной модели дороги (ВМД), являющейся основным элементом автоматизированной системы оперативного управления перевозками (АСОУП);

сохраняемость метода формирования данных через подачу сообщений в ВМД.

Создание подобных АС на пунктах выгрузки даст возможность обеспечить контроль за временем одной разгрузки и учет суммарного времени нахождения вагона под виброразгрузкой. Введение в АС блока управления вибромашиной [30] (рис. 2) дополнительно позволит регулировать параметры виброразгрузки — амплитуду и частоту вынуждающей силы.

Алгоритм управления процессом разгрузки вагонов с применением вибрационной машины заключается в следующем [27, 30]. Накладная вибрационная машина 3 устанавливается на верхнюю обвязку вагона 5. Предварительно несущие элементы конструкции вагона и обшивка кузова оборудуются многокомплектными акселерометрами 4, которые подключаются к блоку управления 2. Блок управления 2 содержит узел опроса акселерометров 6, узел сравнения полученных данных 7 с запрограммированными в нем нормативными показателями, узел регулирования режима работы вибрационной машины 8. В узле сравнения данных 7 сигналы с акселерометров 4 сравниваются с нормативными показателями. При превышении какого-либо нормативного показателя узел сравнения 7 передает сигнал в узел 8, который автоматически корректирует режим работы вибрационной машины.

Рассмотренная АС позволит обеспечить требования ГОСТ 22235–2010 и эксплуатационной документации на вагон, га-

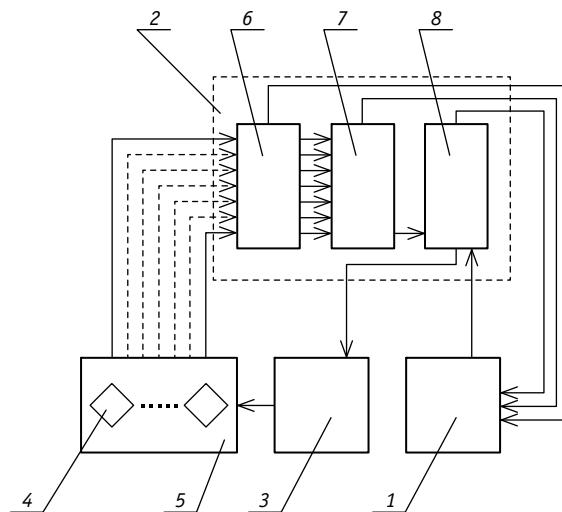


Рис. 2. Схема управления процессом виброразгрузки с использованием блока управления:

1 — пульт оператора; 2 — блок управления; 3 — вибромашина;  
4 — акселерометр; 5 — кузов вагона; 6 — узел опроса;  
7 — узел сравнения; 8 — узел регулирования

рантирует контроль за сохранностью подвижного состава со стороны собственника. Однако в этом случае возникает конфликт интересов. С одной стороны — собственник подвижного состава, заинтересованный в бережном отношении к вагону, с другой — грузополучатель и владелец путей необщего пользования, для которого главная задача состоит в том, чтобы разгрузить вагон любым способом и который не заинтересован в раскрытии фактов нарушения ГОСТ 22235–2010 и эксплуатационной документации на вагон [7, 10, 29].

Упорядочивание взаимоотношений между собственниками вагонов, владельцем инфраструктуры и владельцами предприятий с путями необщего пользования — это ключевой момент в создании системы обеспечения сохранности вагонного парка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в статье примеры охватывают только часть широкого спектра вопросов по организации и управлению сохранностью вагонного парка. В целом проблема может быть решена на основе комплекса задач, требующих научного обоснования. Это, в частности, следующие задачи:

создание методологических основ организации системы сохранности вагонного парка с учетом реформирования железнодорожного транспорта при помощи механизмов функционирования вагонного хозяйства [31];

разработка модели взаимодействия структурных подразделений ОАО «РЖД» с внешней средой (в данном случае — с собственниками путей необщего пользования);

разработка модели непрерывного обеспечения сохранности вагонного парка в условиях реформирования железнодорожного транспорта Российской Федерации;

формирование механизма контроля сохранности вагонного парка на основе процедур оценки состояния вагонов при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ.

## Литература

- Лапшин В.Ф., Орлов М. В. Основы технического обслуживания вагонов. Екатеринбург : УрГУПС, 2006. 373 с.
- Еманаков П. Т. Сохранность вагонного парка: Опыт Свердловской железной дороги // Вагоны и вагонное хозяйство. 1980. Вып. 3.
- Скорина Н. И., Сендеров Г. К. Сохранность вагонного парка // Железнодорожный транспорт. 1992. № 3. С. 34–39. ISSN 0044-4448.
- Сендеров Г. К., Поздина Е. А. Сохранность вагонов — одно из важных условий успешной работы транспорта // Железнодорожный транспорт. 2004. № 3. С. 104–107. ISSN 0044-4448.
- Обеспечивать сохранность вагонов: Положение с сохранностью вагонов грузового парка за 2000–2004 гг. Повреждения вагонов на дорогах РЖД / Г. К. Сендеров, Е. А. Поздина, А. Н. Антропов, С. А. Пряников // Железнодорожный транспорт. 2005. № 10. С. 55–58. ISSN 0044-4448.
- Эксплуатационные испытания опытных полувагонов модели 12-132-03 на Свердловской железной дороге / В. Ф. Лапшин, Г. К. Сендеров, В. Б. Свердлов [и др.] // Железнодорожный транспорт. Сер. : Вагоны и вагонное хозяйство. Ремонт вагонов. 2006. Вып. 3–4. С. 30–39.
- Сохранность вагонного парка: регламентировать ответственность // Вагоны и вагонное хозяйство. 2011. № 2 (26). С. 6–7. ISSN 1817-6089.
- Романович Е. В., Афанасов Г. М., Повороженко Е. В. Обеспечение сохранности полувагонов при их разгрузке вибрационными машинами // Инновационный транспорт. 2013. № 3 (9). С. 3–6. ISSN 2311-164X.
- Клавдиенко О. А. Сохранность вагонного парка: проблемы остаются // Вагоны и вагонное хозяйство. 2013. № 1 (33). С. 23–24. ISSN 1817-6089.
- Медведева В. А. Сохранность вагона — общая проблема участников рынка грузоперевозок // Вагоны и вагонное хозяйство. 2015. № 4 (44). С. 5. ISSN 1817-6089.
- Лапшин В. Ф., Егоров Д. В. Сохранность подвижного состава при виброзагрузке смерзающихся грузов: проблемы и постановка задачи компьютерного моделирования // Инновационный транспорт. 2017. № 1 (23). С. 37–42. DOI: 10.20291/2311-164X-2017-1-37-42. ISSN 2311-164X.
- Павлюков А. Э., Занкович А. В. Исследование тепловых процессов в вагонах при восстановлении сыпучести смерзшихся грузов конвективным разогревом // Транспорт Урала. 2010. № 4 (27). С. 56–61. ISSN 1815-9400.
- Анализ положения с обеспечением сохранности вагонного парка. Москва : Проектно-конструкторское бюро вагонного хозяйства, 2021. 90 с.
- Положение о порядке контроля сохранности грузовых вагонов при их приеме и перевозке на инфраструктуру ОАО «РЖД» и обеспечение их сохранности в процессе перевозки : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29.05.2020 г. № 1153р. URL: <https://docs.ctnd.ru/document/565139670> (дата обращения: 06.02.2021).
- Организационно-технические мероприятия по обеспечению сохранности вагонного парка при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ, недопущению случаев хищения узлов и деталей подвижного состава на Свердловской железной дороге на 2021 год : утв. Н31 Свердловской ж.д. В. Л. Герус 11.02.2021 г. № 76 Н31-64/пд.
- Лапшин В. Ф., Долгих К. О., Кузнецова И. С. Обеспечение сохранности полувагонов при погрузо-разгрузочных работах // Современные проблемы транспортного комплекса России : меж-

## References

- Lapshin V. F., Orlov M. V. Basics of car maintenance [Osnovy tekhnicheskogo obsluzhivaniya vagonov]. Ekaterinburg : USURT, 2006. 373 p.
- Emanakov P. T. Safety of car fleet: experience of the Sverdlovsk Railway [Sokhrannost' vagonnogo parka: Opyt Sverdlovskoy zheleznoy dorogi] // Railway Cars and Carriage Equipment. 1980. Issue 3.
- Skorina N. I., Senderov G. K. Safety of car fleet [Sokhrannost' vagonnogo parka] // Railway Transport. 1992. No. 3. Pp. 34–39. ISSN 0044-4448.
- Senderov G. K., Pozdina E. A. Safety of cars — one of important conditions for successful operation of transport [Sokhrannost' vagonov — odno iz vazhnykh uslovii uspeshnoy raboty transporta] // Railway Transport. 2004. No. 3. Pp. 104–107. ISSN 0044-4448.
- It is necessary to ensure safety of cars: State of safety of freight car fleet for the period of 2000–2004. Damage of cars on railways of the JSC «RZD» [Obespechivat' sokhrannost' vagonov: Polozenie s sokhrannost'yu vagonov gruzovogo parka za 2000–2004 gg. Povrezhdeniya vagonov na dorgakh RZhD] / G. K. Senderov, E. A. Pozdina, A. N. Antropov, S. A. Pryanikov // Railway Transport. 2005. No. 10. Pp. 55–58. ISSN 0044-4448.
- Operational tests of experimental open-box cars model 12-132-03 on the Sverdlovsk Railway [Ekspluatatsionnye ispytaniya optyrnnykh poluvagonov modeli 12-132-03 na Sverdlovskoy zheleznoy dorgoe] / V. F. Lapshin, G. K. Senderov, V. B. Sverdlov [et al.] // Railway Transport. Series «Railway Cars and Carriage Equipment. Repair of wagons». 2006. Issue 3–4. Pp. 30–39.
- Safety of car fleet: it is necessary to regulate responsibility [Sokhrannost' vagonnogo parka: reglamentirovati' otvetstvennost'] // Railway Cars and Carriage Equipment. 2011. No. 2 (26). Pp. 6–7. ISSN 1817-6089.
- Romanovich E. V., Afanasov G. M., Povorozhenko E. V. Preservation of open-box cars during unloading with vibrating machines [Obespechenie sokhrannosti poluvagonov pri ikh razgruzke vibratsionnymi mashinami] // Intrans. 2013. No. 3 (9). Pp. 3–6. ISSN 2311-164X.
- Klavdienko O. A. Safety of car fleet: problems remain [Sokhrannost' vagonnogo parka: problemy ostayutsya] // Railway Cars and Carriage Equipment. 2013. No. 1 (33). Pp. 23–24. ISSN 1817-6089.
- Medvedeva V. A. Car safety — common problem of freight transportation market participants [Sokhrannost' vagona — obshhaya problema uchastnikov rynka gruzoperevozok] // Railway Cars and Carriage Equipment. 2015. No. 4 (44). P. 5. ISSN 1817-6089.
- Lapshin V. F., Egorov D. V. The safety of the rolling equipment during the vibration discharge of the cargo that is to be liquefied: problems and setting of the task of computer modeling [Sokhrannost' podvizhnogo sostava pri vibrozagruzke smerzayushchikhsya gruzov: problemy i postanovka zadachi komp'yuternogo modelirovaniya] // Intrans. 2017. No. 1 (23). Pp. 37–42. DOI: 10.20291/2311-164X-2017-1-37-42. ISSN 2311-164X.
- Pavlyukov A. E., Zankovich A. V. Study of thermal processes in cars at recovery of flowability of frozen freight by convective heating [Issledovanie teplovlykh protsessov v vagonakh pri vosstanovlenii sypuchestyi smerzshikhsya gruzov konvektivnym razgrevom] // Transport of the Urals. 2010. No. 4 (27). Pp. 56–61. ISSN 1815-9400.
- Analysis of state of car fleet safety assurance [Analiz polozeniya s obespecheniem sokhrannosti vagonnogo parka]. Moscow : Planning and design office of car service, 2021. 90 p.
- Statement on procedure for control of safety of freight cars at their reception and transportation to the JSC «RZD» infrastructure and ensurance of their safety during transportation [Polozenie o poryadke kontrolya sokhrannosti gruzovikh vagonov pri ikh prieme i perevozke na infrastrukturu OAO «RZhD» i obespechenie ikh sokhrannosti v protsesse perevozki] : approved by the Order of the JSC «RZD» dated 29.05.2020 No. 1153r. URL: <https://docs.ctnd.ru/document/565139670> (access date: 06.02.2021).
- Organizational and technical measures on car fleet safety assurance at loading-unloading and shunting operations, prevention of stealing of rolling stock elements and assemblies on the Sverdlovsk Railway in 2021 [Organizatsionno-tehnicheskie meropriyatiya po obespecheniyu sokhrannosti vagonnogo parka pri proizvodstve pogruzochno-razgruzochnykh i manevrovikh rabot, nedopushheniyu sluchaev khishheniya uzlov i detaley podvizhnogo sostava na Sverdlovskoy zheleznoy dorgo na 2021 god] : approved by First Deputy Director of the Sverdlovsk Railway V. L. Gerus 11.02.2021 No. 76 NZ1-64/pd.
- Lapshin V. F., Dolgikh K. O., Kuznetsova I. S. Open-box car safety assurance at loading-unloading [Obespechenie sokhrannosti poluvagonov pri pogruzo-razgruzochnykh rabotakh] // Modern problems of the Russian Fed-

- вузовский сборник научных трудов / Под ред. А. Н. Рахмангулова. Магнитогорск : Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. Вып. 2. С. 232–238.
17. ГОСТ 22235–2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. Москва : Стандартинформ, 2011. 18 с.
18. О безопасности железнодорожного подвижного состава (ТР ТС-001–2011) : технический регламент ТС : утв. решением Комиссии Таможенного союза от 15.07.2011 г. № 710. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902293438> (дата обращения: 21.03.2016).
19. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утв. приказом Минтранса России от 21.12.2010 г. № 286. URL: <http://base.garant.ru/55170488/#ixzz7623XSp0Z> (дата обращения: 03.07.2021).
20. Оценка сопротивления усталости элементов кузова полувагона при воздействии накладных вибромашин / В. Ф. Лапшин, К. М. Колясов, В. Б. Свердлов [и др.] // Транспорт Урала. 2008. № 4 (19). С. 53–58. ISSN 1815–9400.
21. Долгих К. О., Лапшин В. Ф., Рязанов Э. М. Разработка мероприятий по обеспечению сохранности подвижного состава при разгрузочных операциях // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы международной научно-технической конференции / Тюменский государственный нефтегазовый университет ; Уральское межрегиональное отделение Российской академии транспорта. Тюмень, 2013. С. 27–31.
22. Колясов К. М., Лапшин В. Ф. Влияние профиля обшивки на допускаемое количество циклов нагружения полувагона накладной вибромашиной // Инновационный транспорт. 2015. № 2 (16). С. 38–41. ISSN 2311–164X.
23. Лапшин В. Ф., Колясов К. М., Долгих К. О. Профиль обшивки и циклы вибронагружения полувагона // Мир транспорта. 2015. Т. 13. № 1 (56). С. 148–153. ISSN 1992–3252.
24. Полувагон модель 12–196–01. Руководство по эксплуатации 196.00.00.000–01 РЭ.
25. Полувагон модель 12–132–03. Руководство по эксплуатации 132.00.00.000–03 РЭ.
26. Полувагон сочлененного типа с разгрузочными люками. Модель 12-6877-02. Руководство по эксплуатации ЦДЛР 0817.00.00.000 РЭ.
27. Лапшин В. Ф., Долгих К. О. Обеспечение сохранности вагонного парка при виброразгрузке с применением автоматизированных систем // Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура : материалы научно-технической конференции / УрГУПС. Екатеринбург, 2011. Вып. 97 (180). Т. 2. С. 94–101.
28. Стратегия развития транспортного машиностроения на период до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.08.2017 г. № 1756-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/klxn1L0FYHPRsEe6c-D9NsI0KM32LMacz.pdf/> (дата обращения: 16.05.2021).
29. Орлова А. М. Кому в России нужен умный вагон // Железнодорожник. 2018. № 5. URL: [https://www.uniwagon.com/multimedia/media\\_about\\_us/komu-v-rossii-nuzhen-umnyj-vagon/](https://www.uniwagon.com/multimedia/media_about_us/komu-v-rossii-nuzhen-umnyj-vagon/) (дата обращения: 03.07.2021).
30. Способ управления работой вибрационной машины при разгрузке сыпучих материалов из вагонов / В. Ф. Лапшин, К. О. Долгих : патент 2465189 Российской Федерации. № 2011104274/11 ; заявл. 07.02.2011 ; опубл. 27.10.2012, Бюл. № 30.
31. Сирена Н. Ф., Цыганов В. В. Механизмы функционирования вагонного хозяйства. Москва : УМЦ ЖДТ, 2010. 188 с.
- eration transport complex: interuniversity collection of scientific papers / Ed. by A. N. Rakhmangulov. Magnitogorsk : Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012. Issue 2. Pp. 232–238.
17. GOST 22235-2010. Freight cars for 1520 mm gauge main line railways. General requirements for safety in loading-unloading and shunting operations [Vagony gruzovye magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Obschii trebovaniya po obespecheniyu sokhrannosti pri proizvodstve pogruzochno-razgruzochnykh i manevrovnykh rabot]. Moscow : Standardinform, 2011. 18 p.
18. On safety of railway rolling stock (TR CU-001-2011) [O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava (TR TS-001-2011)] : technical regulations of the Customs Union : approved by solution of the Customs Union Committee dated 15.07.2011 No. 710. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902293438> (access date: 21.03.2016).
19. Operating rules of the Russian Federation railways [Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossii] : approved by the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 21.12.2010 No. 286. URL: <http://base.garant.ru/55170488/#ixzz7623XSp0Z> (access date: 03.07.2021).
20. Assessment of fatigue resistance of open-box car body elements at influence of overhead vibration machines [Otsenka soprotivleniya ustalosti elementov kuzova poluvagona pri vozdeystvii nakladnykh vibromashin] / V. F. Lapshin, K. M. Kolyasov, V. B. Sverdlov [et al.] // Transport of the Urals. 2008. No. 4 (19). Pp. 53–58. ISSN 1815–9400.
21. Dolgikh K. O., Lapshin V. F., Ryazanov E. M. Development of measures on rolling stock safety assurance at unloading operations [Razrabotka meryopriyatiy po obespecheniyu sokhrannosti podvizhnogo sostava pri razgruzochnykh operatsiyakh] // Transport and transport-technological systems : proceedings of the International scientific and technical conference / Tyumen State Oil and Gas University ; Ural interregional department of the Russian Academy of Transport. Tyumen, 2013. Pp. 27–31.
22. Kolyasov K. M., Lapshin V. F. Impact of lining profile on the number of allowable load cycles of gondola car when vibration machine is used [Vliyanie profiliya obshivki na dopuskaemoe kolichestvo tsiklov nagruzheniya poluvagona nakladnoy vibromashinoy] // Innotrans. 2015. No. 2 (16). Pp. 38–41. ISSN 2311–164X.
23. Lapshin V. F., Kolyasov K. M., Dolgikh K. O. Siding sheathing shape and cycles of vibration loading of gondola cars [Profil' obshivki i tsikly vibronagruzheniya poluvagona] // World of Transport and Transportation. 2015. Vol. 13. No. 1 (56). Pp. 148–153. ISSN 1992–3252.
24. Open-box car model 12-196-01 [Poluvagon model' 12-196-01]. Application guide 196.00.00.000-01 RE.
25. Open-box car model 12-132-03 [Poluvagon model' 12-132-03]. Application guide 132.00.00.000-03 RE.
26. Articulated type open-box car with unloading hatches. Model 12-6877-02 [Poluvagon sochlenennogo tipa s razgruzochnymi lyukami. Model' 12-6877-02]. Application guide TsDRL 0817.00.00.000 RE.
27. Lapshin V. F., Dolgikh K. O. Car fleet safety assurance at vibration unloading with the use of automated systems [Obespechenie sokhrannosti vagonnogo parka pri vibrorazgruzke s primeniem avtomatizirovannykh sistem] // Transport of the XXI century: studies, innovations, infrastructure : proceedings of the scientific and technical conference / USURT. Ekaterinburg, 2011. Issue 97 (180). Vol. 2. Pp. 94–101.
28. Strategy of development of transport engineering for the period up to 2030 [Strategiya razvitiya transportnogo mashinostroeniya na period do 2030 goda] : approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 17.08.2017 No. 1756-r. URL: <http://static.government.ru/media/files/klxn1L0FYHPRsEe6c-D9NsI0KM32LMacz.pdf/> (access date: 16.05.2021).
29. Orlova A. M. Who needs a smart car in Russia [Komu v Rossii nuzhen umnyy vagon] // Zheleznodorozhnik. 2018. No. 5. URL: [https://www.uniwagon.com/multimedia/media\\_about\\_us/komu-v-rossii-nuzhen-umnyj-vagon/](https://www.uniwagon.com/multimedia/media_about_us/komu-v-rossii-nuzhen-umnyj-vagon/) (access date: 03.07.2021).
30. Method for control of operation of a vibration machine at unloading of bulk materials from cars [Sposob upravleniya rabotoy vibratsionnoy mashiny pri razgruzke sypuchikh materialov iz vagonov] / V. F. Lapshin, K. O. Dolgikh : patent 2465189 Russian Federation. No. 2011104274/11 ; filed 07.02.2011 ; publ. 27.10.2012, Bulletin No. 30.
31. Sirina N. F., Tsyanov V. V. Mechanisms of functioning of car services [Mekhanizmy funktsionirovaniya vagonnogo khozyaystva]. Moscow : UMTs ZhDT, 2010. 188 p.

УДК 629.4/539.3

Павел Сергеевич Григорьев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропоезда и локомотивы»  
 Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

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

Сергей Николаевич Коржин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»  
 Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Шерзод Рустамович Ибодуллоев, аспирант кафедры «Механика и математическое моделирование»  
 Национального университета Узбекистана им. Мирзо Улугбека (НУУз), Ташкент, Узбекистан

## ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ КОТЛА ЦИСТЕРНЫ С УЧЕТОМ ЗАПОЛНЕНИЯ ЕЕ ЖИДКИМ ГРУЗОМ

Pavel Sergeevich Grigoryev, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Trains and Locomotives Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

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

Sergey Nikolaevich Korzhin, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Cars and Carriage Facilities Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Sherzod Rustamovich Ibodulloev, postgraduate student, Mechanics and Mathematical Modeling Department, National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek (NUU), Tashkent, Uzbekistan

## Assessment of stability for cylindrical part of tank shell with the consideration for its filling with liquid freight

### Аннотация

В статье рассматривается подход к обоснованию выбора параметров цилиндрической части котла цистерны с позиции потери устойчивости конструкции при воздействии внешнего избыточного давления. Особенность предлагаемого подхода заключается в том, что он учитывает уровень заполнения котла цистерны жидким грузом. Рассматриваемый подход базируется на дифференциальном уравнении пологих цилиндрических оболочек. В качестве прикладываемых внешних нагрузок используются радиальные, обусловленные внешним избыточным и внутренним гидростатическим давлением. Дифференциальное уравнение решается методом Бубнова — Галеркина с применением двойных тригонометрических рядов. Результатом выполненной работы является алгебраическое выражение, позволяющее определить уровень критического избыточного внешнего давления, которое может воздействовать на котлы цистерн при сливе груза, в случае неисправности предохранительных клапанов, после промывки-пропарки и преждевременного закрытия люков цистерн. На основе полученного алгебраического выражения определены значения критического давления при различных уровнях заполнения жидкого груза для разных типов железнодорожных цистерн. Выполнено сравнение полученных результатов с данными, рассчитанными методом конечных элементов.

**Ключевые слова:** подвижной состав, грузовые вагоны, вагон-цистерна, котел цистерны, потеря устойчивости, вариационный метод.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-40-45

### Summary

The paper considers an approach to justification of parameters for a cylindrical part of a tank shell in terms of construction stability loss at influence of external excessive pressure. A feature of the proposed approach is in the fact that it considers a level of filling of a tank shell with a liquid freight. The considered approach is based on a differential equation of gently sloping cylindrical shell. The authors use radial loads that are conditioned by external excessive and internal hydrostatic pressure as applied external forces. The differential equation is solved by the Bubnov — Galerkin method with the use of double trigonometric series. As a result, the authors have gained an algebraic expression that allows determining a level of critical excessive external pressure that can influence on tank shell at freight discharge, in case of failure of pressure relief valves, after flush and steam-curing and premature closure of tank hatches. On the basis of the algebraic expression the authors have determined values of critical pressure at various levels of filling with liquid freight for different types of railway tank-cars. Moreover, they have compared results of the study with data calculated with the use of the finite element method.

**Keywords:** rolling stock, freight cars, tank-car, tank shell, loss of stability, variational method.

## ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

**П**отеря устойчивости конструкций под действием сжимающих напряжений представляет собой важную проблему в строительной механике. Опасность режимов подобного рода связана с тем, что потеря устойчивости обычно происходит в условиях упругой работы материала, т.е. при уровне напряжений, значительно более низком, чем предел текучести материала. Кроме того, потеря устойчивости чаще всего приводит к нарушению работоспособности конструкций. Например, котлы железнодорожных цистерн, потерявшие устойчивость, становятся непригодными для дальнейшей эксплуатации. Поэтому наряду с определением прочности конструкций под действием сжимающих напряжений необходимо оценивать и возможность потери устойчивости.

Согласно действующей нормативно-технической документации [1], грузовые вагоны-цистерны, эксплуатируемые на путях общего пользования, при действии внешнего избыточного давления должны подвергаться проверке расчетными методами на устойчивость сжатых конструкций. Для выполнения этого требования необходимо использовать методы, обеспечивающие достаточный уровень точности. К тому же при расчете устойчивости вагонов-цистерн следует учитывать специфику их работы.

Явление потери устойчивости оболочки котла цистерны известно в литературе как потеря устойчивости оболочки при образовании в ее объеме вакуума [2]. Несмотря на то что расчетным оценкам этого явления посвящено много публикаций (например, [3–7]), некоторые особенности, связанные с эксплуатацией котлов цистерн (в частности, возможность неполного заполнения грузового объема), требуют определенной корректировки расчетов, позволяющей эти особенности учитывать. Общие подходы к расчетным оценкам устойчивости достаточно полно описаны в фундаментальных трудах и отдельных публикациях [8–10].

Потеря устойчивости, как правило, приводит к появлению значительных деформаций, а следовательно, к запрету эксплуатации и последующему списанию единицы подвижного состава.

Рассмотрим, как заполнение жидким грузом влияет на потерю устойчивости вагона-цистерны. Для решения поставленной задачи воспользуемся теоретическими предпосылками, соответствующими так называемой моментной теории пологих оболочек, предложенной В. З. Власовым [11]. Эта теория многократно апробирована при расчетах конструкций цистерн [12–14], и можно сказать, что практически все котлы современных цистерн рассчитаны с использованием ее зависимостей.

Цель нашего исследования заключается в разработке и проверке методики оценки возможности потери устойчивости цилиндрической оболочки, соответствующей по параметрам оболочке котла цистерны.

Методика основана на составлении дифференциального уравнения деформации цилиндрической оболочки в перемещениях (уравнение Доннелла), применении аппроксимации перемещений в виде двойных рядов Фурье и интегрировании уравнения с использованием метода Бубнова — Галеркина [15, 16].

Для определения критических значений внешнего давления решается частная проблема собственных значений. При этом в сфере вагоностроения задача потери устойчивости котла цистерны с учетом жидкого груза решается впервые. Для

проверки разработанной методики полученные результаты сопоставляются с аналогичными результатами, вычисленными с помощью программного комплекса, основанного на методе конечных элементов (МКЭ).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вначале оценим уровень критического избыточного внешнего давления без учета заполнения котла цистерны жидким грузом. Для этого рассмотрим несвязанную форму уравнений оболочек, в которой имеется одно уравнение, содержащее в себе только прогиб в радиальном направлении. Преимущество этого уравнения для решения практических задач состоит в необходимости отыскания лишь одного вида деформаций. Остальные перемещения, такие как  $u$  (продольные) и  $v$  (тангенциальные), находятся из связывающих функций. В литературных источниках [17–19] приводится результирующее уравнение пологих цилиндрических оболочек, содержащее в себе только одну неизвестную функцию прогиба  $w$  (радиальные перемещения) и известные нагрузки. Для рассматриваемой схемы нагружения результирующее уравнение будет иметь вид

$$D\nabla^8 w + \frac{E \cdot h}{R^2} \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = \\ = \nabla^4 \left( p + \frac{\partial m_x}{\partial x} + \frac{\partial m_y}{\partial y} + F_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + F_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2F_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) - \\ - \frac{1}{R} \left( (2+\mu) \frac{\partial^3 f_y}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 f_y}{\partial y^3} + \mu \frac{\partial^3 f_x}{\partial x^3} - \frac{\partial^3 f_y}{\partial x \partial y^3} \right). \quad (1)$$

Следует отметить, что уравнение (1) известно как уравнение Доннелла и представляет собой вариант несвязанного уравнения оболочек. То есть оно отражает совокупность статических уравнений (равновесия бесконечно малого элемента оболочки), уравнений деформаций, выраженных через перемещения и соотношения Гука. Использование этого уравнения позволяет в практических задачах получить явное решение, что особенно важно при оценке работоспособности конструкции под воздействием внешних нагрузок.

Будем исследовать схему нагружения, в которой оболочка котла цистерны рассматривается как шарнирно опертая по торцам (рис. 1). В качестве внешней нагрузки принято внешнее избыточное давление.

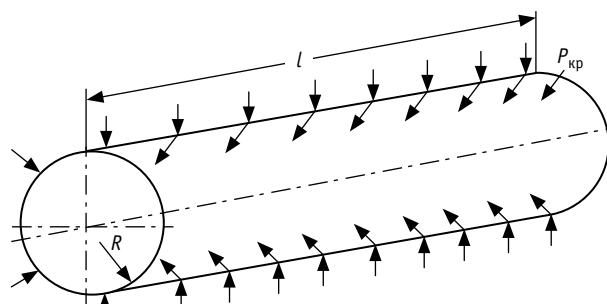


Рис. 1. Схема нагружения оболочки котла цистерны внешним давлением

Для анализируемой схемы нагружения уравнение Доннела (1) примет вид

$$D\nabla^8 w + \frac{E \cdot h}{R^2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + F_y \nabla^4 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0, \quad (2)$$

где  $D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\mu^2)}$  — цилиндрическая жесткость оболочки, кН·м;

$E$  — модуль упругости материала оболочки, МПа;

$h$  — толщина оболочки, мм;

$\mu$  — коэффициент Пуассона;

$R$  — радиус кривизны оболочки, м;

$w$  — радиальные перемещения, направленные по нормали к срединной поверхности оболочки, мм. В данном случае для пологой оболочки перемещение направлено по радиусу к центру окружности поперечного сечения:

$$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4},$$

$$\nabla^8 = \frac{\partial^8}{\partial x^8} + 4 \frac{\partial^8}{\partial x^6 \partial y^2} + 6 \frac{\partial^8}{\partial x^4 \partial y^4} + 4 \frac{\partial^8}{\partial x^2 \partial y^6} + \frac{\partial^8}{\partial y^8};$$

$F_y$  — сила, нормальная к продольной площадке сечения, кН/м<sup>2</sup>.

Для решения поставленной задачи будем учитывать нормальные усилия  $N_1$  на поперечных площадках сечений и  $N_2$  — на площадках продольных сечений. Как было отмечено ранее, примем, что торцевые сечения оболочки имеют шарнирное опирание и могут перемещаться в радиальном направлении. Концевые сечения остаются недеформируемыми. Для такой схемы закрепления оболочки аппроксимирующая функция собственного решения задачи в двойных тригонометрических рядах будет иметь вид

$$w(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=2}^{\infty} w_{m,n} \cos(\alpha_0 y) \sin(\beta_0 x), \quad (3)$$

где  $\alpha_0 = m/R$ ,  $\beta_0 = n\pi/l$ ;

$n$  — коэффициент члена ряда, соответствующий числу полуволн по продольной оси;

$m$  — коэффициент члена ряда, соответствующий числу волн по окружности оболочки;

$l$  — длина цилиндрической оболочки, м.

Подставив аппроксимирующую функцию в основное разрешающее уравнение и применив вариационный метод Бубнова — Галеркина, получим аналитическое выражение для определения критического уровня избыточного внешнего давления, при котором происходит потеря устойчивости цилиндрической оболочки в «малом»:

$$D(\alpha_0^2 + \beta_0^2)^4 + \frac{Eh}{R^2} \alpha_0^4 = P_{kp} R \beta_0^2 (\alpha_0^2 + \beta_0^2)^2. \quad (4)$$

Из (4) найдем зависимость для определения внешнего критического давления котла цистерны без учета заполнения жидким грузом:

$$P_{kp} = \frac{D(\alpha_0^2 + \beta_0^2)^4 + \frac{Eh}{R^2} \alpha_0^4}{R \beta_0^2 (\alpha_0^2 + \beta_0^2)^2}. \quad (5)$$

Следует обратить внимание, что при конкретном значении коэффициента ряда, соответствующем числу полуволн по окружности, минимальное число полуволн по продольной оси будет обеспечено при значении  $n = 1$ .

## ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКОГО УРОВНЯ ИЗБЫТОЧНОГО ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ЗАПОЛНЕНИЯ ЖИДКИМ ГРУЗОМ

При заполнении железнодорожной цистерны жидким грузом на ее стенки начинает действовать гидростатическое давление. Это внутреннее давление вызывает появление мембранных усилий в оболочке. Знак таких усилий будет противоположен знакам усилия от внешнего избыточного давления. Ориентировочно можно принять, что фиктивная радиальная нагрузка, обусловленная внешним давлением, будет уменьшаться из-за нагрузки, вызванной гидростатическим давлением. Выражение (5), используемое при оценке влияния внешнего давления на устойчивость, легко трансформировать для случая гидростатического давления, если добавить в числитель формулы с положительным знаком произведение гидростатического давления на числитель формулы. Потому в матрице алгебраических уравнений для коэффициентов рядов искомых величин к искомому  $P_{kp}$  с обратным знаком должно быть добавлено гидростатическое давление.

На наш взгляд, интересно оценить, как будут влиять сжимающие напряжения в верхних волокнах цилиндрической оболочки котла, рассматриваемого как балки на двух опорах. Для этого необходимо выполнить расчет оболочки как балки с жестким контуром поперечного сечения и с положительным знаком добавить найденные напряжения к искомому критическому давлению. Таким образом, в полученной формуле в числителе появится слагаемое, равное произведению сжимающих напряжений на знаменатель формулы.

При разложении гидростатической нагрузки в ряд по дуге окружности сохраняется нулевой член ряда, который определяет долю внутреннего усилия, возникающего от гидростатической нагрузки. Нагрузка в данном случае распределена по окружности равномерно, т.е. вызывает усилие на продольных площадках сечения  $F_y$ , равное произведению этого усилия на радиус. Таким образом, при отыскании  $P_{kp}$  надо учитывать влияние этого нагружения. Оно противоположно направлено внешнему давлению и поэтому будет повышать значение критической нагрузки, рассчитанное без его учета.

Расчетная схема для определения гидростатического давления представлена на рис. 2. Давление, действующее на стенки оболочки, можно представить в виде

$$P_{гидр} = \rho g R (1 - \cos \beta), \quad (6)$$

где  $\rho$  — плотность перевозимого жидкого груза, кг/м<sup>3</sup>;

$\beta$  — уровень угла налива жидкого груза, рад.



Рис. 2. Схема для определения гидростатического давления

Запишем гидростатическое давление в виде тригонометрического ряда:

$$P_{\text{гидр}}(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P_{0,n} \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right). \quad (7)$$

Коэффициенты тригонометрического ряда найдем при помощи вычисления работы на возможных перемещениях, для этого вычислим следующий интеграл, используя формулы (6) и (7):

$$\begin{aligned} & \int_0^l \int_0^{\beta_h} \rho g R (1 - \cos \beta) \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) dx d\beta = \\ & = \int_0^l \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P_{0,n} \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) dx. \end{aligned}$$

Решив интеграл, получим выражение

$$P_{0,n} = \frac{4\rho g R (\beta_{\text{нал}} - \sin(\beta_{\text{нал}}))}{n\pi^2}. \quad (8)$$

Подставив (8) в (5), найдем окончательное аналитическое выражение для определения критического уровня избыточного давления, при котором происходит потеря устойчивости цилиндрической оболочки, с учетом внутреннего гидростатического давления:

$$P_{\text{кр}} = \frac{D(\alpha_0^2 + \beta_0^2)^4 + \frac{Eh}{R^2} \alpha_0^4}{R\beta_0^2(\alpha_0^2 + \beta_0^2)^2} + \frac{4\rho g R (\beta_{\text{нал}} - \sin(\beta_{\text{нал}}))}{n\pi^2}. \quad (9)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 и 2 приведены результаты вычисления для различных геометрических параметров оболочечных конструкций 4- и 8-осных цистерн, полученные без учета жидкого груза по формуле (5) и с учетом жидкого груза по формуле (9). При этом гидростатическое давление жидкого груза задавалось для угла налива 162°, что соответствует коэффициенту заполнения 0,9.

Для качественной и количественной проверки предложенной методики выполнена оценка критического значения внешнего давления методом конечных элементов в программном комплексе Ansys, определен коэффициент запаса потери устойчивости при внешнем избыточном давлении, рассчитанном на основе рассмотренных в настоящей статье методов.

Таблица 1  
Критическое значение  
наружного давления без учета жидкого груза

Тип цистерны	Геометрические параметры	Минимальное количество полуволн	$P_{\text{кр}}, \text{кПа}$
4-осная	$R = 1500 \text{ мм}$ $l = 10500 \text{ мм}$ $h = 10 \text{ мм}$	$m = 4$ $n = 1$	107,0
8-осная	$R = 1700 \text{ мм}$ $l = 17500 \text{ мм}$ $h = 10 \text{ мм}$	$m = 3$ $n = 1$	50,4

Таблица 2  
Критическое значение  
наружного давления с учетом жидкого груза

Тип цистерны	Геометрические параметры	Минимальное количество полуволн	$P_{\text{кр}}, \text{кПа}$
4-осная	$R = 1500 \text{ мм}$ $l = 10500 \text{ мм}$ $h = 10 \text{ мм}$	$m = 4$ $n = 1$	122,0
8-осная	$R = 1700 \text{ мм}$ $l = 17500 \text{ мм}$ $h = 10 \text{ мм}$	$m = 3$ $n = 1$	67,4

На рис. 3 представлены формы потери устойчивости оболочечных конструкций без учета заполнения жидким грузом. Как видно, форма потери устойчивости, полученная методом конечных элементов, качественно соответствует форме, полученной с использованием уравнения Доннелла.

Сравним результаты вычислений, в основу которых положены разные подходы (табл. 3).

## ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализируя результаты, приведенные в табл. 1–3, можно сделать следующие выводы.

Наименьшее критическое значение внешнего давления соответствует первой гармонике изменения перемещений по длине ( $n = 1$ ), а в кольцевом направлении — значениям гармоники  $m$  не ниже третьей.

Для принятых геометрических параметров оболочек наименьшее критическое значение избыточного внешнего давления четырехосных цистерн составило 107, восьмiosных — 50,4 кПа. Из-за меньшей жесткости оболочки котла критическое давление восьмiosных цистерн примерно вдвое ниже, чем у четырехосных.

Жидкий груз, находящийся внутри котла, повышает критическое значение давления, поскольку создает по крайней мере гидростатическое давление, направленное наружу, что снижает фактическое суммарное внешнее давление, и, таким образом, конструкция сопротивляется потере устойчивости. Это наглядно видно из данных табл. 3: при увеличении уровня налива критическое значение давления повышается.

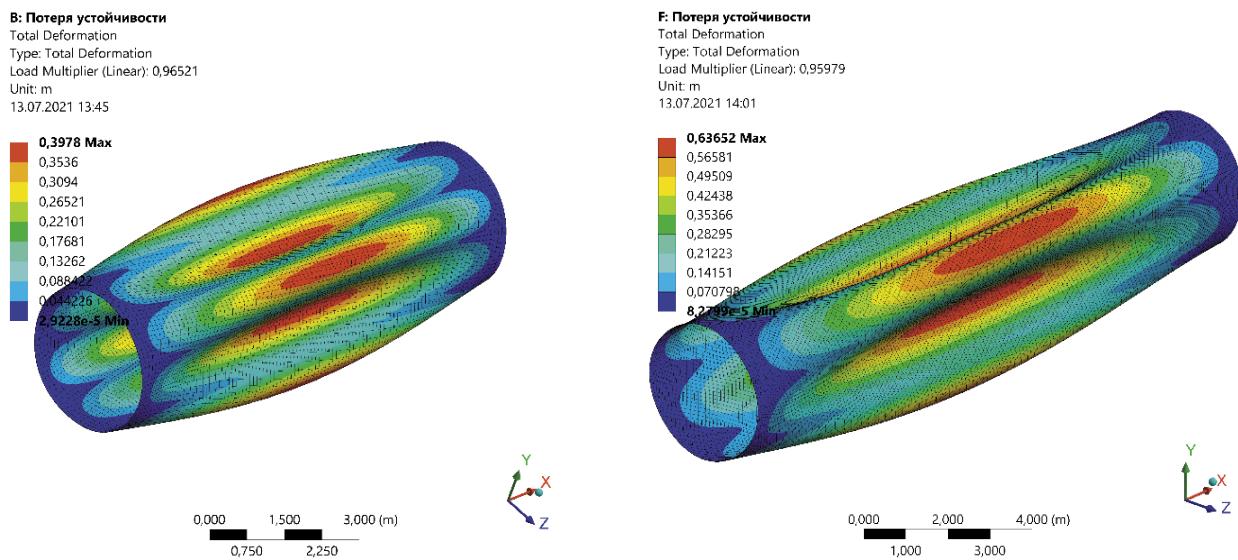


Рис. 3. Формы потери устойчивости для оболочек, соответствующих габаритным размерам восьмiosной (слева) и четырехосной (справа) железнодорожных цистерн

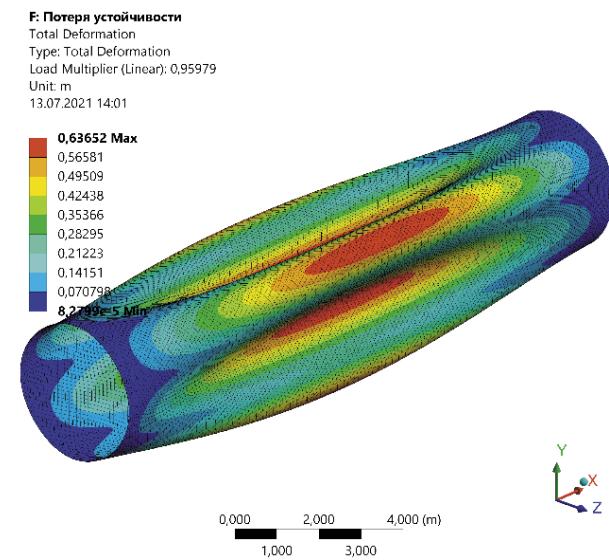
Таблица 3

Результаты вычислений критического уровня внешнего давления, рассчитанного по уравнению Доннелла, и коэффициента запаса потери устойчивости, рассчитанного при помощи МКЭ

Тип цистерны	Геометрические параметры	$\beta_{\text{нал}}, {}^\circ$	$P_{\text{кр}}, \text{kPa}$	$k_3$
4-осная	$R = 1500 \text{ мм}$ $l = 10500 \text{ мм}$ $h = 10 \text{ мм}$	180	125,7	0,9
		162	122,0	0,93
		144	118,5	0,95
		126	115,3	0,96
		108	112,6	0,96
		90	110,4	0,97
		0	107	0,96
8-осная	$R = 1700 \text{ мм}$ $l = 17500 \text{ мм}$ $h = 10 \text{ мм}$	180	71,6	0,81
		162	67,4	0,86
		144	63,4	0,89
		126	59,8	0,92
		108	56,7	0,95
		90	54,2	0,96
		0	50,4	0,96

Примечание.  $\beta_{\text{нал}}$  — угол налива жидким грузом;  $P_{\text{кр}}$  — критическое значение давления, рассчитанное на основе аналитического выражения;  $k_3$  — коэффициент запаса потери устойчивости, рассчитанный при помощи МКЭ.

Количественное сравнение результатов, полученных с помощью разработанной методики и по МКЭ (см. табл. 3), показало их удовлетворительное соответствие. Коэффициент запаса, характеризующий расхождение результатов, находится в пределах от 0,81 до 0,97, что соответствует расхождению от 3 до 19 %.



То, что коэффициент запаса во всех вариантах меньше единицы, говорит о том, что критические значения, вычисленные по предложенной методике, несколько превышают значения, полученные по МКЭ. Это можно объяснить тем, что метод конечных элементов дает расчет критических значений давления с запасом.

Следует отметить, что данные, полученные на основе МКЭ, нельзя считать эталоном, так как при этом используются приближенные методы. Следовательно, выполненное сопоставление необходимо воспринимать как сравнение результатов, полученных по различным методикам, что тоже способствует проверке разработанного метода.

Анализ литературных источников, посвященных потере устойчивости, позволил сделать несколько выводов о применимости результатов, полученных расчетным путем. Приведенные выше расчеты выполнены для идеально ровной пологой цилиндрической оболочки. Наиболее обоснованный расчет критического уровня внешнего избыточного давления следует выполнять с учетом начальных несовершенств оболочечной конструкции, подтверждаемых экспериментальными данными.

Экспериментальные данные часто показывают большой разброс и существенные отклонения от расчетных значений. Нередко при экспериментальных исследованиях уровень критического давления оказывается ниже вычисленных значений, что можно объяснить несовершенством оболочечной конструкции. Поэтому в случае, когда оболочки изготовлены недостаточно тщательно, а начальные прогибы достигают величины порядка толщины оболочки, некоторые исследователи предлагают снижать расчетные значения критического давления примерно вдвое. Существует также рекомендация при проведении практических расчетов на устойчивость умножать минимальное значение критического давления на коэффициент, учитывающий отношение  $R/h$ . Для рассматриваемых размеров котлов цистерн этот коэффициент, согласно [18], предлагается принимать в пределах 0,6–0,7.

## Литература

- ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Москва : Стандартинформ, 2016. 57 с.
- Тимошенко С. П. Сопротивление материалов. Т. 2. Более сложные вопросы теории и задачи. Москва : Наука, 1965. 480 с.
- Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем / 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Наука, 1967. 984 с.
- Погорелов А. В. Геометрическая теория устойчивости оболочек. Москва : Наука, 1966. 296 с.
- Товстик П. Е. Устойчивость тонких оболочек: Асимптотические методы. Москва : Наука, 1995. 320 с.
- Тонкостенные оболочечные конструкции: Теория, эксперимент и проектирование : монография / А. Абрюш, Г. В. Бабель, С. Ч. Баттерман [и др.]. Москва : Машиностроение, 1980. 607 с.
- Новожилов В. В. Теория тонких оболочек / 2-е изд., испр. и доп. Ленинград : Судпромгиз, 1962. 431 с.
- Огибалов П. М. Вопросы динамики и устойчивости оболочек. Москва : МГУ, 1963. 417 с.
- Филин А. П. Элементы теории оболочек / 2-е изд., доп. и перераб. Ленинград : Страйиздат, 1975. 256 с.
- Тимошенко С. П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. Москва : Наука, 1971. 808 с.
- Власов В. З. Избранные труды. Общая теория оболочек. Москва : Изд-во АН СССР, 1962. 528 с.
- Конструирование и расчет вагонов : учебник / В. В. Лукин, Л. А. Шадур, В. Н. Котуранов [и др.] ; под ред. В. В. Лукина. Москва, 2000. 726 с.
- Котуранов В. Н. Определение внутренних усилий в цилиндрической части оболочки котла цистерны. Большегрузные восьмiosные вагоны. Москва : Транспорт, 1968. 288 с.
- Mathematical model of oscillations of a railway tank car with partial filling under shunting collision / S. Bespalko, P. Grigorev, Sh. Ibodulloev [et al.]. 2020 IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 883 (2020) 012134 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/883/1/012134>
- Lopatin A. V., Morozov E. V. Approximate buckling analysis of the CCFF orthotropic plates subjected to in-plane loading // International Journal of Mechanical Sciences. 2015. 85. Pp. 38–44.
- Onyia M., Rowland-Lato E. O., Ike Ch. Ch. Galerkin — Vlasov Variational Method for the Elastic Buckling Analysis of SSSC and SSSS Rectangular Plates // International Journal of Engineering Research and Technology. 2020. Vol. 13. No. 6. Pp. 1137–1146. ISSN 0974–3154.
- Доннелл Л. Г. Балки, пластины и оболочки. Москва : Наука, 1982. 568 с.
- Биргер И. А., Пановко Я. Г. Прочность. Устойчивость. Колебания: справочник в 3-х т. Т. 3. Москва : Машиностроение, 1968. 567 с.
- Grigoriev P. S., Ibodulloev Sh. R., Poyonov V. B. An approach for estimating critical temperatures of buckling of shallow cylindrical shell. (2019) <https://uzjournals.edu.uz/btstu/vol2019/iss2/9>.

Объем статьи 0,66 авторских листа

## References

- GOST 33211-2014. Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities [Vagoni gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam]. Moscow : Standardinform, 2016. 57 p.
- Timoshenko S. P. Strength of materials. Vol. 2. More difficult questions of theory and tasks [Soprotivlenie materialov. T. 2. Bolee slozhnye voprosy teorii i zadachi]. Moscow : Science, 1965. 480 p.
- Volmir A. S. Stability of deformable systems [Ustoychivost' deformiruemых system] / 2nd edition, revised and expanded. Moscow : Science, 1967. 984 p.
- Pogorelov A. V. Geometrical theory of shell stability [Geometricheskaya teoriya ustoychivosti obolochek]. Moscow : Science, 1966. 296 p.
- Tovstik P. E. Stability of thin shell: asymptotic methods [Ustoychivost' tonkikh obolochek: Asimptoticheskie metody]. Moscow : Science, 1995. 320 p.
- Thin-walled shell constructions: theory, experiment and designing [Tonkostennye obolochchene konstruktii: Teoriya, eksperiment i proekтировanie] : monograph / A. Abrush, G. V. Babel, S. Ch. Batterman [et al.]. Moscow : Machinery, 1980. 607 p.
- Novozhilov V. V. Theory of thin shell [Teoriya tonkikh obolochek] / 2nd edition, revised and expanded. Leningrad : Sudpromgiz, 1962. 431 p.
- Ogibalov P. M. Questions of dynamics and shell stability [Voprosy dinamiki i ustoychivosti obolochek]. Moscow : MSU, 1963. 417 p.
- Filin A. P. Elements of shell theory [Elementy teorii obolochek] / 2nd edition, revised and expanded. Leningrad : Stroyizdat, 1975. 256 p.
- Timoshenko S. P. Stability of rods, plates and shell [Ustoychivost' sterzhney, plastin i obolochek]. Moscow : Science, 1971. 808 p.
- Vlasov V. Z. Selected papers. Common shell theory [Izbrannye trudy. Obshchaya teoriya obolochek]. Moscow : Publishing House of USSR Academy of Sciences, 1962. 528 p.
- Designing and calculation of cars [Konstruirovaniye i raschet vagonov] : textbook / V. V. Lukin, L. A. Shadur, V. N. Koturanov [et al.] ; ed. by V. V. Lukin. Moscow, 2000. 726 p.
- Koturanov V. N. Determination of internal forces in cylindrical part of tank shell. High-capacity eight-axle cars [Opredelenie vnutrennikh usilii v tsilindricheskoy chasti obolochki kotla tsisterny. Bol'shegruznye vos'miosnye vagony]. Moscow : Transport, 1968. 288 p.
- Mathematical model of oscillations of a railway tank car with partial filling under shunting collision / S. Bespalko, P. Grigorev, Sh. Ibodulloev [et al.]. 2020 IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 883 (2020) 012134 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/883/1/012134>
- Lopatin A. V., Morozov E. V. Approximate buckling analysis of the CCFF orthotropic plates subjected to in-plane loading // International Journal of Mechanical Sciences. 2015. 85. Pp. 38–44.
- Onyia M., Rowland-Lato E. O., Ike Ch. Ch. Galerkin — Vlasov Variational Method for the Elastic Buckling Analysis of SSSC and SSSS Rectangular Plates // International Journal of Engineering Research and Technology. 2020. Vol. 13. No. 6. Pp. 1137–1146. ISSN 0974–3154.
- Donnell L. G. Beams, plates and shell [Balki, plastiny i obolochki]. Moscow : Science, 1982. 568 p.
- Birger I. A., Panovko Ya. G. Strength. Stability. Fluctuations [Prochnost'. Ustoychivost'. Kolebaniya]: handbook in 3rd volumes. Vol. 3. Moscow : Machinery, 1968. 567 p.
- Grigoriev P. S., Ibodulloev Sh. R., Poyonov V. B. An approach for estimating critical temperatures of buckling of shallow cylindrical shell. (2019) <https://uzjournals.edu.uz/btstu/vol2019/iss2/9>.

УДК 656.225

Елена Николаевна Тимухина, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Андрей Александрович Гордиенко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Владислав Владиславович Лесных, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Кристина Эдуардовна Хамидуллина, магистрант направления подготовки «Технология транспортных процессов» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## О ПОВЫШЕНИИ НАДЕЖНОСТИ СПОСОБОВ РАЗМЕЩЕНИЯ И КРЕПЛЕНИЯ ГРУЗОВ В ВАГОНАХ

Elena Nikolaevna Timukhina, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Andrey Alexandrovich Gordienko, PhD in Engineering, Associate Professor, Stations, Junctions and Freight Work Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Vladislav Vladislavovich Lesnykh, postgraduate student, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Kristina Eduardovna Khamidullina, graduate student of training direction «Technology of transportation processes», Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### On increase of reliability of methods for positioning and strapping of freight in cars

#### Аннотация

В статье представлены подходы к комплексному исследованию задачи по повышению надежности способов размещения и крепления грузов в вагонах, минимизации возникающих коммерческих неисправностей. Предложены решения, в основе которых лежит точность проектирования способов погрузки и расчета кинематических параметров сортировочных горок и активизация внедрения новых надежных средств крепления.

**Ключевые слова:** груз, вагон, коммерческие неисправности, отцепки вагонов, способы размещения и крепления, средства крепления, сортировочная горка, кинематические параметры движения.

#### Summary

The paper presents approaches to complex study of a task on increase of reliability of methods for positioning and strapping of freight in cars, minimization of emerging commercial failures. The authors suggest solutions based on accuracy of design of loading methods and calculation of kinematic parameters of humps and activation of introduction of new reliable strapping facilities.

**Keywords:** freight, car, commercial failures, car setouts, methods of positioning and strapping, strapping facilities, hump, kinematic parameters of movement.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-46-51

Стратегическим приоритетом развития ОАО «РЖД» является повышение качества транспортных услуг [1], в том числе выполнение обязательств перед клиентами по обеспечению качественного размещения и крепления грузов в вагонах.

Возникающие в пути следования коммерческие неисправности приводят к неблагоприятным технологическим и финансовым последствиям, а в конечном счете негативно влияют на качество транспортных продуктов.

Анализ данных информационной системы ОАО «РЖД» АСКМ Безопасность показывает, что ежегодно на сети железных дорог с коммерческими неисправностями отцепляется около 40 тыс. вагонов, или порядка 0,2 % от общего количества погруженных вагонов. При этом ежегодные расходы перевозчика на устранение коммерческих неисправностей составляют 15 млн руб.

Чаще всего на пунктах коммерческого осмотра вагоны отцепляются из-за расстройства погрузки в пути следования и нарушений технических условий размещения и крепления грузов.

Коммерческие неисправности возникают по двум причинам. Первая — несовершенство методик по расчету креплений и проектированию сортировочных горок, что приводит к нерациональному использованию реквизита крепления и превышению допустимых скоростей соударения в подгороных парках. Вторая — взаимодействующие факторы, такие как плохое обучение работников, занятых на погрузке,

неправильный выбор скорости при роспуске вагонов, применение средств креплений, не соответствующих документам на погрузку [2].

Следует сказать, что полностью исключить коммерческие неисправности в ближайшее время не представляется возможным: несмотря на актуальность задач по их предотвращению и повышению качества погрузки, велика вероятность воздействия многих негативных факторов и на станциях погрузки, и в пути следования [3].

Таким образом, возникает необходимость решить две взаимосвязанные проблемы: снизить вероятность коммерческих неисправностей и минимизировать их негативные последствия. В том числе создать методику оценки надежности способов размещения и крепления, разработать методы повышения надежности, ориентированные на минимизацию коммерческих неисправностей и улучшение качества обслуживания потребителей услуг железнодорожного транспорта.

В статье предложены подходы к комплексному изучению проблемы повышения надежности способов размещения и крепления грузов в вагонах и минимизации коммерческих неисправностей.

Прежде всего отметим основные недостатки действующей методики [4]:

при расчетах не учитываются индивидуальные свойства грузов, а также параметры и условия перевозок, не рассматривается воздействие пространственной системы сил;

при определении силы трения вместо коэффициента трения скольжения используется коэффициент трения сцепления (в покое);

не учитываются предварительные усилия в проволоке креплений, крепления рассчитываются при помощи тригонометрических зависимостей, которые не позволяют специалистам ОАО «РЖД» осуществлять оперативный контроль правильности выбранных параметров при проверке способов крепления и приеме груза к перевозке;

используется сложный подход по определению ускорений грузов в пути следования;

уточненная методика расчета проволочных растяжек не соответствует практике проектирования способов погрузки.

Исходя из вышесказанного в ходе исследования разработан алгоритм обоснования технологии крепления грузов на открытом подвижном составе (рис. 1). Положения, отличные от тех, что содержатся в «Технических условиях размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах» [4], обведены на рис. 1 пунктирными линиями. Методика,ложенная в основу программы [5], позволяет в зависимости от условий перевозки выбирать правильный реквизит креплений. Таким образом, усовершенствованная методика повышает надежность расчетов по обоснованию креплений, что снижает риски коммерческих неисправностей.

Следующий предлагаемый метод повышения надежности способов размещения и крепления — применение новых средств крепления. В частности, предложена новая методика расчетного обоснования крепления грузов с текстильными креплениями.

Продольные и поперечные упругие силы (натяжение)  $R_{\text{упр.}i}$  в  $i$ -м упругом элементе крепления, имеющем модуль упругости  $E$ , определяются по следующим формулам, кН:

$$R_{\text{упр.}ix} = E \cdot \sum_{i=1}^{n_p} \frac{A_i}{l_i} \cdot \Delta l_i^x \leq [R_{i0}],$$

или

$$R_{\text{упр.}ix} = E \cdot \sum_{i=1}^{n_p} \frac{A_i}{l_i} \cdot \Delta x \cdot \frac{a_i}{l_i} \leq [R_{i0}],$$

где  $E$  — модуль упругости, характеризующий материал элемента крепления, кН/м<sup>2</sup>;

$A_i$  — площадь поперечного сечения элемента крепления, м<sup>2</sup>;

$\Delta x$  — сдвиг груза вдоль вагона, м;

$a_i$  и  $l_i$  — геометрические параметры элементов крепления, м;

$[R_{i0}]$  — рабочая нагрузка текстильной ленты, кН;

$$R_{\text{упр.}iy} = E \cdot \sum_{i=1}^{n_p} \frac{A_i}{l_i} \cdot \Delta l_i^y \leq [R_{i0}],$$

или

$$R_{\text{упр.}iy} = E \cdot \sum_{i=1}^{n_p} \frac{A_i}{l_i} \cdot \Delta y \cdot \frac{b_i}{l_i} \leq [R_{i0}],$$

где  $\Delta y$  — сдвиг груза поперек вагона, м;

$b_i$  — геометрический параметр элементов крепления, м.

Для повышения надежности способов размещения и крепления грузов в вагонах особое значение имеет соблюдение допускаемых скоростей соударения вагонов на сортировочных горках. С этой точки зрения недостатки методики расчета горок [6] заключаются в следующем:

используются усредненные вычисления скорости отцепа на участке и времени его скатывания;

невозможно определить мгновенную скорость движения отцепа в конкретный момент времени; формулы расчета скорости отцепа в конце участка и профильной высоты участка приняты для идеальных связей (без трения, без учета начальной скорости);

не учитывается скольжение колес отцепов на участках тормозных позиций; формула сопротивления от воздушной среды и ветра является неточной, так как относительная скорость ветра принята за абсолютную.

Все это доказывает необходимость уточнения методики [6].

В ходе исследования разработана методика определения кинематических параметров, основанная на положениях теоретической механики, при этом акцент сделан на расчете ускорения на каждом участке сортировочной горки (рис. 2).

Чтобы описать движение вагона на скоростных участках сортировочной горки математически, необходимо использовать принцип Д'Аламбера в проекциях на спускную часть сортировочной горки [7].

Известно, что результирующая сила, т.е. сила, которая позволяет вагону скатываться по спускной части сортировочной горки, определяется по формуле, кН:

$$|\Delta F_{xi}| = F_{xi} - |F_{ci}|,$$

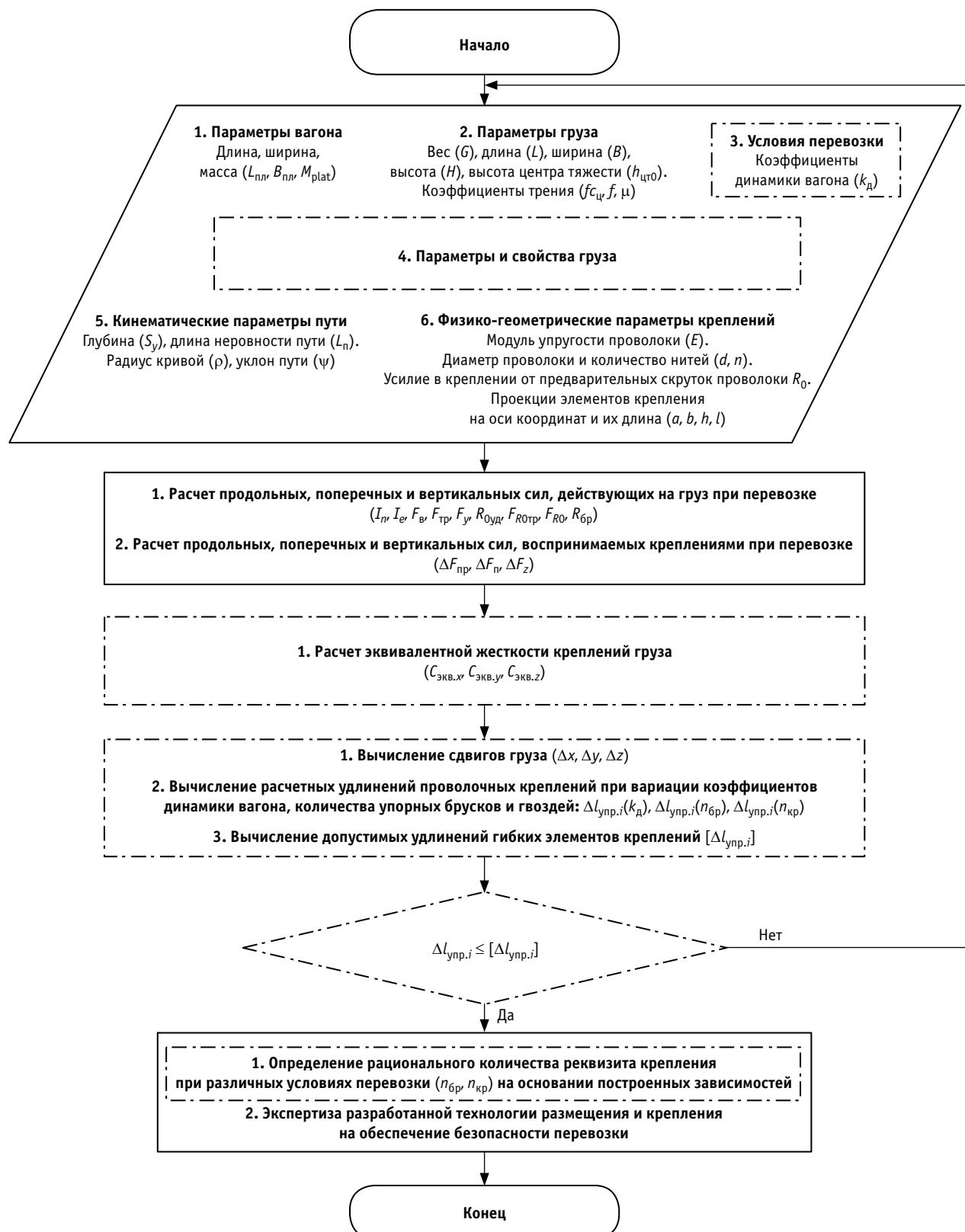


Рис. 1. Алгоритм обоснования технологии крепления грузов на открытом подвижном составе:  
— отличительные блоки разработанного алгоритма от алгоритма по «Техническим условиям» [4]

где  $F_{xi}$  — проекция силы тяжести гужевого вагона на направление движения вагона с учетом и/или без учета проекции силы попутного ветра, с помощью которой вагон скатывается по уклону спускной части горки, кН;

$|F_{ci}|$  — сила сопротивления всякого рода, кН.

Для того чтобы найти ускорение движения вагона  $a_i$  по спускной части сортировочной горки, воспользуемся аналитической формулой

$$a_i = \frac{|\Delta F_{xi}|}{M_{\text{пр}}} 10^3,$$

где  $i$  — номера участков профиля пути сортировочной горки ( $i = 1, \dots, 9$ );

$M_{\text{пр}}$  — приведенная и/или воображаемая масса вагона с грузом с учетом момента инерции вращающихся частей (колесных пар) на всех участках спускной части горки, кг.

По формуле скорости и пути из элементарной физики найдем скорость ( $v_{cxi} = v_i$ ) и путь ( $l_{cxi} = l_i = x_i$ ) движения вагона на участках профиля сортировочной горки:

$$v_i = v_{h,i} + |a_i|t_i;$$

$$l_i = x_i = v_{h,i}t_i + \frac{1}{2}|a_i|t_i^2,$$

где  $v_{h,i}$  — начальная скорость и/или скорость входа вагона на исследуемый участок профиля горки с предыдущего участка, т.е. величина, принимаемая из результатов расчетов предыдущих участков горки, м/с;

$a_i$  — ускорение движения вагона,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

Если две последние формулы решить совместно, можно найти время движения вагона  $t_i$  на скоростных участках профиля пути, с:

$$t_i = \frac{1}{|a_i|} \left( -v_{h,i} + \sqrt{v_{h,i}^2 + 2|a_i|l_i} \right)$$

Методика реализована в программной среде [8], при этом учтены равнозамедленное движение, степень нажатия тормозных колодок и климатические факторы (рис. 3). Полученные результаты аналогично существующему подходу позволяют построить графики скорости,

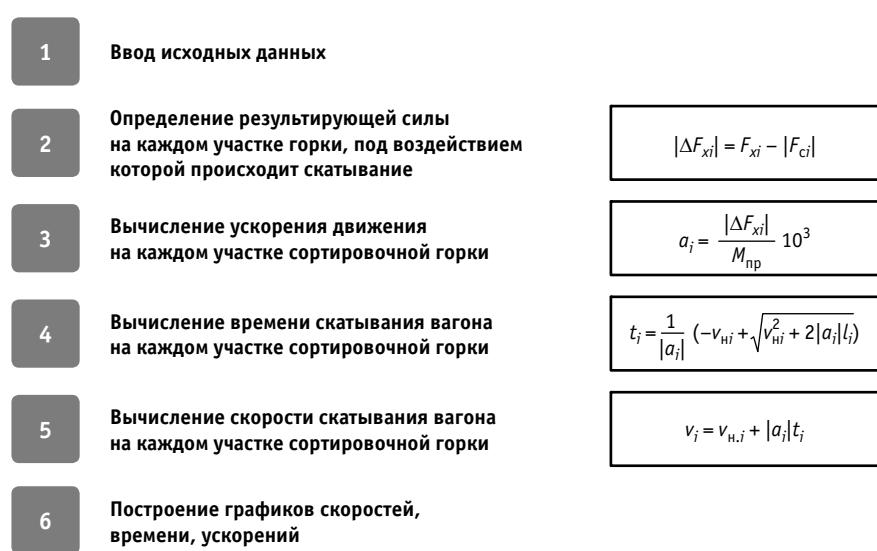


Рис. 2. Алгоритм методики определения кинематических параметров сортировочной горки

Участки спускной части горки	Элементы участков спускной части горки	<i>l</i>	<i>a<sub>1</sub></i>	<i>t<sub>1</sub></i>	<i>v<sub>1</sub></i>	
		м	м/с <sup>2</sup>	с	м/с	км/ч
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
—	ВГ	0	0	0	1,7	8,865
СК1	СК1	39,95	0,519	9,558	6,659	23,97
СК2	До С	54,957	0,323	11,7	7,351	26,46
	После С	73,59	0,2	14,153	7,84	28,22
	КБ	81,891	0,166	15,2	8,01	28,88
1ТП	ЗТ	92,118	-2,027	16,8	4,77	17,17
	ОТ	102,59	0,166	18,917	5,122	18,44
ПР	До С	122,591	0,136	22,638	5,629	20,3
	После С	143,862	0,13	26,264	6,10	22,0
	КБ	154,263	0,127	27,939	6,315	22,73
2ТП	ЗТ	161,721	-2,067	29,539	3,01	10,83
	ОТ	174,863	0,127	33,666	3,518	12,7
С3	До С1	190,863	0,048	38,07	3,731	13,4
	С1	216,553	0,041	44,711	4,0	14,4
	С2	237,553	0,041	49,821	4,214	15,17
	С3	261,553	0,041	55,366	4,442	16,0
СП1	СП1	320,733	0,044	67,915	4,49	18,0
3ТП	КБ	326,983	0,041	69,161	5,04	18,15
	ЗТ	330,948	-2,15	70,161	2,89	10,4
СП2	СП2	382,232	0,034	86,343	3,448	12,4
	ЗТБ	385,232	-1,817	89,5	0,993	3,58

Рис. 3. Пример расчета по разработанной методике (попутный ветер малой величины)

времени, ускорения и выполнить проверку динамических характеристик горки. Визуализированный пример результатов расчетов приведен на рис. 4–6 [9, 10].

Разработанная методика имеет ряд достоинств, которые заключаются в определении мгновенных скоростей движения на каждом участке сортировочной горки; соотношении используемых формул с основными принципами теоретической ме-

ханики; повышении точности прогнозирования скоростей соударения вагонов в сортировочном парке за счет возможности настройки под реальные условия и проверки достоверности на практике.

Главное достоинство методики — она позволяет уточнить кинематические параметры при соударении и подобрать параметры, чтобы снизить риск превышения нормативных скоростей соударений.

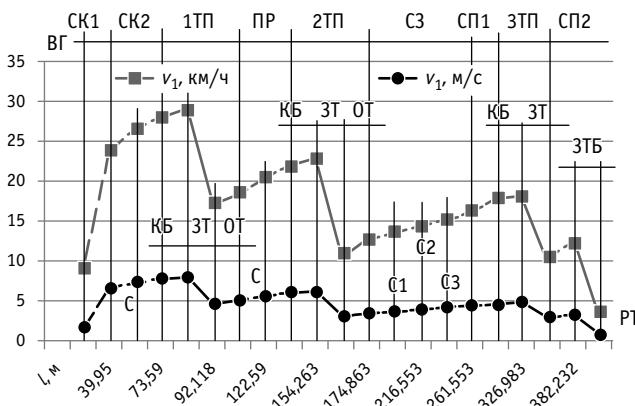


Рис. 4. График скорости

Несмотря на значительное количество отцепок коммерческих неисправных вагонов, моделей оценки экономических последствий от них не существует. В связи с этим предлагается оригинальная модель оценки, представленная на рис. 7.

Таким образом, в исследовании предложено научное решение задачи, направленной на повышение качества транспортных услуг за счет минимизации коммерческих неисправностей. Это достигается повышением точности проектирования способов погрузки и расчета кинематических параметров сортировочных горок, а также активизацией внедрения новых надежных средств крепления. Кроме того, разработана модель оценки потенциального эффекта от применения рассматриваемых мероприятий.

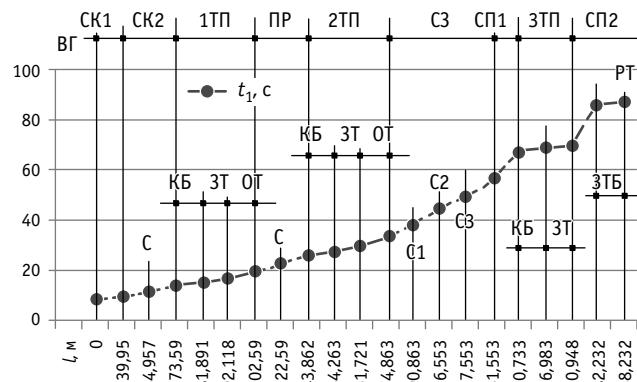


Рис. 5. График времени

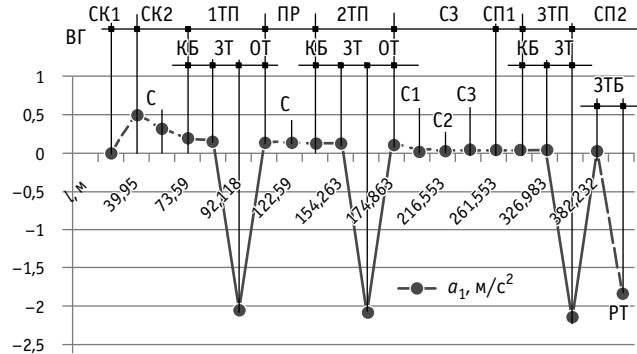


Рис. 6. График ускорения



Рис. 7. Модель оценки экономических последствий отцепок вагонов с грузами для устранения коммерческих неисправностей

## Литература

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 г. № 1734-р.
2. Тимухина Е. Н., Гордиенко А. А. Основные причины и технологические последствия коммерческих неисправностей вагонов с грузами на колесном ходу // Транспорт Урала. 2015. № 2 (45). С. 32–37. ISSN 1815–9400.
3. Тимухина Е. Н., Гордиенко А. А. Исследование технологических и экономических последствий от отцепок вагонов для устранения коммерческих неисправностей // Транспорт Урала. 2015. № 3 (46). С. 23–31. ISSN 1815–9400.
4. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах : утв. распоряжением Министерства путей сообщения Российской Федерации от 27.05.2003 г. № ЦМ-943.
5. Расчет рационального количества крепежных изделий для обеспечения прочности выбранных элементов крепления груза на открытом подвижном составе / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014614585 Российской Федерации. № 2014611838 ; заявл. 06.03.2014 ; опубл. 20.05.2014.
6. Тимухина Е. Н., Гордиенко А. А., Плахотич И. С. Результаты исследований параметров движения вагона по спускной части сортировочной горки при различных режимах прохода тормозных позиций // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 28–31. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-28-31. ISSN 1815–9400.
7. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Уточненные математические модели движения вагона по уклону сортировочной горки при воздействии силы тяжести и встречного ветра // Наука и техника транспорта. 2015. № 1. С. 66–74. ISSN 2074–9325.
8. Расчет кинематических характеристик движения вагонов на участках продольных профилей сортировочных горок при воздействии встречного ветра малой величины / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017614017 Российской Федерации. № 2017611049 ; заявл. 09.02.2017 ; опубл. 05.04.2017.
9. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А., Плахотич И. С. Результаты исследований движения вагона по спускной части сортировочной горки при попутном ветре // Бюллетень транспортной информации. 2016. № 12 (258). С. 31–36. ISSN 2072–8115.
10. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А., Плахотич И. С. Графическое представление результатов исследований движения вагона по спускной части сортировочной горки при попутном ветре // Транспорт: наука, техника, управление. 2017. № 3. С. 7–12. ISSN 0236–1914.

## References

1. The Russian Federation transport strategy for the period up to 2030 [Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda] : approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 22.11.2008 No. 1734-r.
2. Timukhina E. N., Gordienko A. A. Main causes and operational impact of commercial malfunctions of freight cars on wheels [Osnovnye prichiny i tekhnologicheskie posledstviya kommercheskikh neispravnostey vagonov s gruzami na kolesnom khodu] // Transport of the Urals. 2015. No. 2 (45). Pp. 32–37. ISSN 1815–9400.
3. Timukhina E. N., Gordienko A. A. Study of process and economic effects of car uncoupling for elimination of commercial faults [Issledovanie tekhnologicheskikh i ekonomicheskikh posledstviy ot ottsepok vagonov dlya ustranieniya kommercheskikh neispravnostey] // Transport of the Urals. 2015. No. 3 (46). Pp. 23–31. ISSN 1815–9400.
4. Technical specifications on freight loading and strapping of goods in cars and containers [Tekhnicheskie usloviya razmeshheniya i krepleniya gruzov v vagonakh i konteynerakh] : approved by the Order of Ministry of Railways of the Russian Federation dated 27.05.2003 No. TSM-943.
5. Calculation of rational number of fasteners for provision of strength of selected freight strapping elements on open rolling stock [Raschet ratsional'nogo kolichestva krepezhnykh izdeliy dlya obespecheniya prochnosti vybrannykh elementov krepleniya gruzu na otkrytomy podvizhnym sostave] / Kh. T. Turanov, A. A. Gordienko : certificate on state registration of a computer program 2014614585 Russian Federation. No. 2014611838 ; filed 06.03.2014 ; publ. 20.05.2014.
6. Timukhina E. N., Gordienko A. A., Plakhotich I. S. Results of investigations of car movement parameters on the lowering part of sorting hump in different walk-through modes of brake positions [Rezul'taty issledovaniy parametrov dvizheniya vagona po spusknoy chasti sortirovochnoy gorki pri razlichnykh rezhimakh prokhoda tormoznykh pozitsiy] // Transport of the Urals. 2017. No. 2 (53). Pp. 28–31. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-28-31. ISSN 1815–9400.
7. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Refined mathematical model of rolling speed of rail car moving downgrade on hump under the influence of gravity and back wind [Utochennyye matematicheskie modeli dvizheniya vagona po uklonu sortirovochnoy gorki pri vozdeystvii sily tyazhesti i vstrechnogo vetra] // Science and technology in transport. 2015. No. 1. Pp. 66–74. ISSN 2074–9325.
8. Calculation of kinematic characteristics of car movement on sections of vertical alignment of humps at influence of light headwind [Raschet kinematicheskikh kharakteristik dvizheniya vagonov na uchastkakh prodol'nykh profiley sortirovochnykh gorok pri vozdeystvii vstrechnogo vetra maloy velichiny] / Kh. T. Turanov, A. A. Gordienko : certificate on state registration of a computer program 2017614017 Russian Federation. No. 2017611049 ; filed 09.02.2017 ; publ. 05.04.2017.
9. Turanov Kh. T., Gordienko A. A., Plakhotich I. S. The results of researches of car movement on the incline part of a marshalling hump under the fair wind [Rezul'taty issledovaniy dvizheniya vagona po spusknoy chasti sortirovochnoy gorki pri poputnom vetro] // Bulletin of Transport Information. 2016. No. 12 (258). Pp. 31–36. ISSN 2072–8115.
10. Turanov Kh. T., Gordienko A. A., Plakhotich I. S. Graphical presentation of researches results of car's management on the incline part of the marshalling hump with fair wind [Graficheskoe predstavlenie rezul'tatov issledovaniy dvizheniya vagona po spusknoy chasti sortirovochnoy gorki pri poputnom vetro] // Transport: science, equipment, management. 2017. No. 3. Pp. 7–12. ISSN 0236–1914.

Объем статьи 0,73 авторских листа

УДК 656.21:656.613.1

Тэк Енг Ли, аспирант кафедры «Технология транспортных процессов и логистика»  
Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия,

Роман Григорьевич Король, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология транспортных процессов и логистика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС),  
Хабаровск, Россия

## ОБОСНОВАНИЕ ЭТАПНОСТИ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОГО УЗЛА ПУСАН (РЕСПУБЛИКА КОРЕЯ) В УСЛОВИЯХ РОСТА ОБЪЕМА ПЕРЕВОЗОК

Taek Young Lee, postgraduate student, Technology of Transport Processes and Logistics Department,  
Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia,

Roman Grigoryevich Korol, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Transport Processes  
and Logistics Department, Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia

### Justification of the stages of development of the Busan transport hub (Republic of Korea) in the context of an increase in the volume of traffic

#### Аннотация

В статье рассмотрено поэтапное развитие перерабатывающей способности транспортного узла Пусан (Республика Корея) с учетом оптимальности финансовых вложений и результативности предлагаемых мероприятий за определенный временной период при увеличении количества поступающего транспорта и контейнеров. Выделены три этапа — организационно-технологический, технический и инфраструктурный. Если после реализации этих этапов пункт перевалки не будет справляться с возрастающим контейнеропотоком, предусмотрен четвертый этап — строительство нового транспортного узла. Определены факторы, составляющие перерабатывающую способность транспортного узла, классифицированные по взаимодействующим видам транспорта. Факторы имеют разные финансовые затраты и соответственно различное влияние на повышение перерабатывающей способности элементов транспортного узла. Представлено математическое описание эффекта от реализации фактора на определенном этапе развития транспортного узла.

**Ключевые слова:** транспортный узел, этапы развития транспортного узла, перерабатывающая способность, порт Пусан.

#### Summary

The paper considers the gradual development of the processing capacity of the Busan transport hub (Republic of Korea) with an increase in the number of incoming transport and containers, taking into account the optimal financial investments and the effectiveness of the measures under consideration in a certain time period. The paper presents four stages — organizational, technological, technical, infrastructural, if after the implementation of these stages the transshipment point cannot cope with the increasing container flow, then the fourth stage should be considered — the construction of a new transport hub. The factors that make up the processing capacity of the transport hub were determined, the factors were classified by interacting modes of transport. The factors have different financial costs and influence on the strengthening of the processing capacity of the elements of the transport node, the paper presents a mathematical description of the effect of the implementation of the factor at a certain stage of the development of the transport node.

**Keywords:** stage of development of the transport hub, transport hub, refining capacity, Busan port.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-52-57

#### ВВЕДЕНИЕ

Транспортный узел (ТУ), представляющий собой взаимодействие различных транспортных средств и логистического оборудования, обрабатывает грузо- и контейнеропотоки в зависимости от своей инфраструктуры, технологии и компоновки элементов. Если объем поступающих грузов увеличивается, а транспортный узел как техническая система имеет предел производственной мощности, это приводит к необходимости развития перерабатывающей и пропускной способности инфраструктуры [1]. Финансирование мероприятий по развитию инфраструктуры обычно осуществляется пропорционально из государственного и частного бюджета, причем суммы выделяемых средств ограничены. Для максимальной эффективности принимаемых решений и оптимальности инвестиционных вложений следует рассматривать развитие транспортного узла поэтапно, и соответствующим образом должны разрабатываться мероприятия. Конечная цель этапности развития транспортного узла — увеличение перерабатывающей и пропускной способности за счет эффективности мероприятий по совершенствованию взаимодействия транспортных средств в ограниченном временном периоде и стоимостном выражении. В статье рассмотрены этапы развития транспортного узла Пусан (Республика Корея) при увеличении поступающего объема грузопотока с учетом оптимальности бюджета, временного периода и принимаемых решений [2].

#### ЭТАПНОСТЬ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОГО УЗЛА ПУСАН

Перерабатывающая способность транспортного узла, включающего различные элементы, такие как транспортные средства, железнодорожные станции, морской порт, контейнерные терминалы и т.д., должна обеспечивать прием и обработку всех входящих грузов и контейнеров без простоя подвижного состава и иметь резерв перерабатывающей способности.

Если возникают простои транспорта и длительность выполнения грузовых операций не позволяет принять весь суточный объем грузов, то перерабатывающей способности транспортного узла недостаточно (рис. 1). В этом случае непринятый суточный грузопоток перейдет на следующие сутки, что негативно повлияет на загрузку элементов транспортного узла в рассматриваемый период [3].

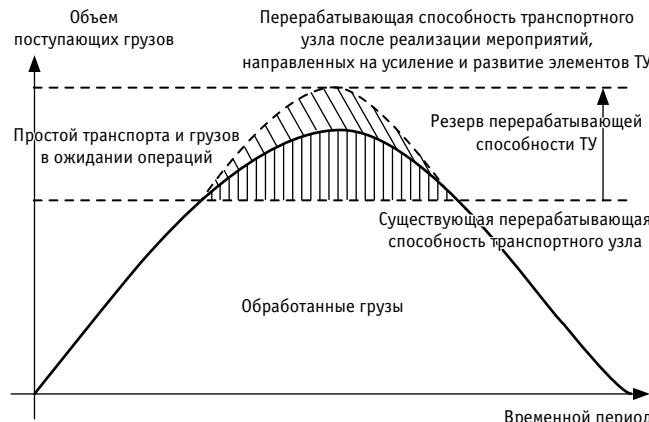


Рис. 1. Взаимосвязь перерабатывающей способности транспортного узла и поступающего грузопотока

Транспортный узел Пусан включает два морских порта — действующий порт Пусан и новый порт Пусан, строительство которого было завершено в 2010 г., а также соответствующую железнодорожную инфраструктуру. Новый порт Пусан предназначен только для переработки контейнеров. Значительная часть контейнерных перевозок из порта Пусан была переориентирована в новый порт, их обработка в 2019 г. составила 68,3 % от общего контейнеропотока узла Пусан [4].

В общей структуре грузоперевозок Республики Корея преобладает автомобильный транспорт, поэтому новый порт Пусан имеет более развитую и специализированную инфраструктуру для автомобильных перевозок. Груженый автотранспорт поступает напрямую на терминалы морского порта для разгрузки и погрузки контейнеров. Железнодорожный транспорт представляет собой сложную транспортно-технологическую организацию, доставка контейнеров железнодорожной дорогой включает промежуточное звено, контейнеры прибывают на железнодорожных платформах, затем осуществляется перегрузка контейнеров на автомобили для транспортировки на причалы порта. Такая технология доставки контейнеров увеличивает время перевозки и стоимость, что делает железнодорожный транспорт менее конкурентоспособным по сравнению с автомобильным.

Когда объем поступающего грузопотока приближается к перерабатывающей способности транспортного узла или превышает ее, необходимо принимать соответствующие меры [5]. Перерабатывающая способность транспортного узла Пусан определяется следующими факторами [6]:

$$F_{\text{пер}} = \left[ \sum_{n=1}^3 F_{\text{пр}}^n, \sum_{n=1}^6 F_{\text{по-раз}}^n, \sum_{n=1}^2 F_{\text{cox}}^n, IF, EF \right], \quad (1)$$

где  $F_{\text{пр}}^n = \{N_{\text{пр}}^n, D_{\text{пр}}^n, S_{\text{пр}}^n, WT_{\text{пр}}^n, N_{\text{ворот}}^2, PT_{\text{ворот}}^2\}$ , ( $n = 1, 2, 3$ ) — пропускная способность системы «станция — порт»;

$N_{\text{пр}}^n$  — количество транспортных средств;

$D_{\text{пр}}^n$  — расстояние перемещения транспортных средств по маршруту «причал порта — железнодорожная площадка»;

$S_{\text{пр}}^n$  — скорость движения транспортных средств;

$WT_{\text{пр}}^n$  — время простоя транспортных средств в ожидании технологических и грузовых операций;

$N_{\text{ворот}}^2$  — количество пунктов пропуска автотранспорта в порту;

$PT_{\text{ворот}}^2$  — время, необходимое транспортному средству, чтобы проехать пункт пропуска;

$F_{\text{пр}}^1$  — пропускная способность элемента «причал порта — железнодорожная площадка»;

$F_{\text{пр}}^2$  — пропускная способность автомобильного пункта пропуска;

$F_{\text{пр}}^3$  — пропускная способность железнодорожной станции;

$F_{\text{по-раз}}^n = \{N_{\text{кр}}^n, C_{\text{кр}}^n, S_{\text{кр}}^n, P_{\text{кр}}^n, N_{\text{гpf}}^n, L_{\text{гpf}}^n, C_{\text{гpf}}^n, DE_{\text{гpf}}^n\}$ , ( $n = 1, 2, 3, 4$ ) — перерабатывающая способность подъемно-транспортного оборудования;

$N_{\text{кр}}^n$  — количество подъемно-транспортного оборудования;

$C_{\text{кр}}^n$  — грузоподъемность подъемно-транспортного оборудования;

$S_{\text{кр}}^n$  — состояние подъемно-транспортного оборудования;

$P_{\text{кр}}^n$  — производительность подъемно-транспортного оборудования;

$N_{\text{гpf}}^n$  — количество грузовых фронтов;

$L_{\text{гpf}}^n$  — длина грузового фронта;

$C_{\text{гpf}}^n$  — вместимость грузового фронта;

$DE_{\text{гpf}}^n$  — емкость площадок причала;

$F_{\text{по-раз}}^1$  — перерабатывающая способность подъемно-транспортного оборудования элемента технологической линии «судно — причал»;

$F_{\text{по-раз}}^2$  — перерабатывающая способность подъемно-транспортного оборудования элемента технологической линии «причал — автотранспорт»;

$F_{\text{по-раз}}^3$  — перерабатывающая способность подъемно-транспортного оборудования элемента технологической линии «автотранспорт — железнодорожная площадка»;

$F_{\text{по-раз}}^4$  — перерабатывающая способность подъемно-транспортного оборудования элемента технологической линии «железнодорожная площадка — железнодорожный транспорт»;

$F_{\text{cox}}^n = \{A_{\text{пло}}^n, UA_{\text{пло}}^n, N_{\text{эт}}^n, P_{\text{кон}}^n, PT_{\text{кон}}^n\}$ , ( $n = 1, 2$ ) — перерабатывающая способность контейнерного терминала;

$A_{\text{пло}}^n$  — площадь терминала;

$UA_{\text{пло}}^n$  — фактическая вместимость терминала;

$N_{\text{эт}}^n$  — количество этапов переработки контейнеров;

$P_{\text{кон}}^n$  — технология складирования контейнеров;

$PT_{\text{кон}}^n$  — срок хранения контейнера;

$F_{\text{cox}}^1$  — перерабатывающая способность контейнерного терминала морского порта;

$F_{\text{cox}}^2$  — перерабатывающая способность контейнерного терминала железнодорожного транспорта;

$IF = \{N_{\text{рд}}, N_{\text{р}}, T_{\text{там}}, WT_{\text{тех}}\}$  — внутренние факторы, влияющие на перерабатывающую способность транспортного узла;

$N_{\text{рд}}$  — количество рабочих дней;

$N_p$  — количество работников;

$T_{\text{там}}$  — время прохождения таможенных процедур или карантина внешнеторговых грузов;

$WT_{\text{тех}}$  — технические задержки (ремонт, обслуживание и т.п.);

$EF = \{W, ES_{\text{вну}}, ES_{\text{мир}}\}$  — внешние факторы, влияющие на перерабатывающую способность транспортного узла;

$W$  — задержка обработки транспорта и снижение производительности системы из-за погодных условий;

$ES_{\text{вну}}$  — сокращение объема грузопотока из-за ухудшения внутренней экономической ситуации;

$ES_{\text{мир}}$  — сокращение объема грузопотока из-за ухудшения экономической ситуации в мире.

В табл. 1 представленные факторы классифицированы по категориям.

Таблица 1

Классификация факторов, составляющих перерабатывающую способность транспортного узла

Организационно-технологические	Технические	Инфраструктурные
$WT_{\text{тр}}^n, S_{\text{тр}}^n, PT_{\text{ворот}}^2$ , $S_{\text{кп}}^n, P_{\text{кп}}^n, P_{\text{кон}}^n, PT_{\text{кон}}^n$ , $N_{\text{рд}}, N_p, T_{\text{там}}, WT_{\text{тех}}$	$N_{\text{тр}}^n, N_{\text{кп}}^n, C_{\text{кп}}^n$	$D_{\text{тр}}^n, N_{\text{ворот}}^2, N_{\text{гра}}^n$ , $L_{\text{гра}}^n, C_{\text{гра}}^n, DE_{\text{гра}}^n$ , $A_{\text{пло}}^n, UA_{\text{пло}}^n, N_{\text{эт}}^n$

Как правило, факторы, относящиеся к организационно-технологической группе, требуют меньше финансовых затрат и времени на реализацию мероприятий для повышения эффективности процессов в транспортном узле. Факторы инфраструктурной и технической групп требуют больших инвестиций и времени на осуществление разработанных мероприятий. Поэтому развитие транспортного узла целесообразно рассматри-

вать поэтапно: начинать с организационно-технологических решений, характеризуемых наименьшими затратами и сроками реализации, а затем переходить к техническим и инфраструктурным мероприятиям [7, 8].

Для оптимизации инвестиций в развитие транспортного узла необходимо распределить мероприятия на отдельные временные элементы  $T_n$  с учетом объема входящих грузов, масштабов развития и экономической обоснованности [9]. На рис. 2 представлен график этапности развития транспортного узла Пусан, включающий четыре основных элемента.

Взаимосвязь между поступающими объемами контейнеропотока и экономическим обоснованием затрат на поэтапное развитие транспортного узла (см. рис. 2) можно описать математически [10]:

$$T_{(n-1) \rightarrow n} = \begin{cases} \left| V_{n-1}^{\max} - V_n^{\max} \right| = \Delta V > \sum_{n=1}^x F_n^{\text{ЭЛТУ}} \\ T_v^{\text{обр}} \rightarrow \max \\ C_{n-1}^{\text{pre}} + C_{n-1}^{\text{lost}} \geq \sum_{f=1}^m c_n^f \end{cases}, \quad (2)$$

где  $V_n^{\max}$  — максимальные суточные объемы обработки поступающих контейнеров на  $n$ -м этапе ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots, x$ ), конт./сут;  $n-1$  — этап, предшествующий этапу развития перерабатывающей способности элементов транспортного узла;

$\sum_{n=1}^x F_n^{\text{ЭЛТУ}}$  — перерабатывающая способность элементов транспортного узла, конт./сут;

$T_v^{\text{обр}}$  — время обработки контейнеров, поступающих на терминалы, ч;

$\sum_{f=1}^m c_n^f$  — стоимость развития факторов  $f$ , влияющих на перерабатывающую способность элементов ТУ на  $n$ -м этапе, у.е.;

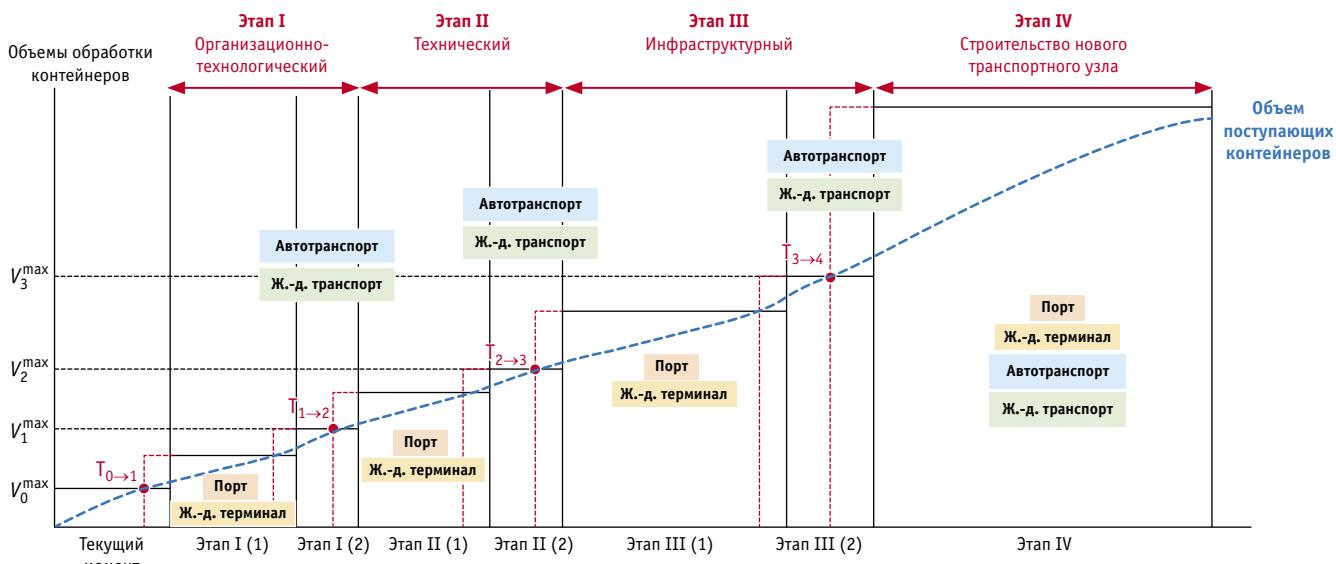


Рис. 2. Графическое представление этапности развития транспортного узла Пусан

Таблица 2

Этапность развития факторов транспортного узла по элементам

Этапы	Элементы транспортного узла			
	Железнодорожный транспорт	Железнодорожный терминал	Автотранспорт	Порт
1	$WT_{tp}^3, S_{tp}^3$	$S_{kp}^3, P_{kp}^3, P_{kon}^2, PT_{kon}^2, N_{\text{эт}}^2$	$WT_{tp}^2, S_{tp}^2, PT_{\text{ворот}}^2$	$WT_{tp}^1, S_{tp}^1, S_{kp}^{1,2}, P_{kp}^{1,2}, P_{kon}^1, PT_{kon}^1, N_{\text{эт}}^1$
2	$N_{tp}^3, C_{kp}^4, N_{kp}^4$	$N_{kp}^3, C_{kp}^3$	$N_{tp}^2$	$N_{tp}^1, N_{kp}^{1,2}, C_{kp}^{1,2}$
3	$N_{\text{грф}}^4, L_{\text{грф}}^4, C_{\text{грф}}^4$	$N_{\text{грф}}^3, L_{\text{грф}}^3, C_{\text{грф}}^3, A_{\text{пло}}^2, UA_{\text{пло}}^2$	$N_{\text{ворот}}^2$	$N_{\text{грф}}^1, L_{\text{грф}}^1, C_{\text{грф}}^1, DE_{\text{грф}}^1, A_{\text{пло}}^1, UA_{\text{пло}}^1$
4	$D_{tp}^3$	—	$D_{tp}^2$	$D_{tp}^1$

$C_n^{pre}$  — стоимость выполнения технологических операций с контейнерами и транспортом на  $n$ -м этапе, у.е.;

$C_n^{lost}$  — стоимость потерь на  $n$ -м этапе (например, издержки из-за необработанных объемов контейнеров), у.е.

На принятие решения о развитии факторов  $f$ , от которых зависит перерабатывающая способность элементов транспортного узла, влияют непропорциональное увеличение объемов поступающих контейнеров и возможность элементов ТУ обработать этот контейнеропоток. Когда один или несколько элементов транспортного узла не способны обработать поступающий контейнеропоток, это критично для всей системы в целом, следовательно, необходимо рассмотреть возможность перенаправить избыточный контейнеропоток на другие элементы ТУ, которые имеют более развитую инфраструктуру и соответствующие резервы перерабатывающей способности [11]. Экономическая оценка этапности включает разницу между затратами на развитие факторов, влияющих на перерабатывающую способность элементов транспортного узла, и общей стоимостью технологических операций на обработку контейнеров и транспорта, а также суммой финансовых потерь, вызванных нестабильной работой системы. Если выполняется только одно условие в системе уравнений (2), то существует риск чрезмерного инвестирования.

В зависимости от принадлежности к определенным элементам транспортного узла факторы, влияющие на перерабатывающую способность, были сгруппированы и разделены на этапы (табл. 2).

На первом этапе развития порта Пусан в качестве организационно-технологических мероприятий рассматривается совершенствование технологии работы подъемно-транспортного оборудования и сокращение непроизводительных перемещений, а также совершенствование способов размещения контейнеров и сокращение сроков их хранения на площадке. На железнодорожном и автомобильном транспорте это реализация мероприятий, связанных с временем ожидания операций и скоростью движения транспортных средств. На втором этапе особое внимание уделяется количеству и производительности подъемно-транспортного оборудования для терминалов железной дороги и порта, а также количеству транспортных средств для перемещения контейнеров с железнодорожной площадки на терминалы порта и обратно. Третий этап, наиболее сложный и экономически затратный, предполагает усиление

инфраструктуры морского порта, автотранспорта и путевого развития железнодорожной составляющей ТУ. Четвертый этап развития транспортного узла — создание нового порта с подведением железной и автомобильной дороги или организация «сухого» порта. Этот этап возможен только в условиях ограниченности инфраструктурного развития существующих элементов транспортного узла.

В транспортном узле обработка контейнеров происходит за счет взаимодействия каждого транспортного средства, терминального устройства и логистического оборудования, соответственно развитие основных элементов должно осуществляться параллельно, а не индивидуально. Техническое оснащение и инфраструктура морских портов более развита и напрямую влияет на перерабатывающую способность транспортного узла, поэтому необходимо развивать железнодорожный транспорт и автомобильные подходы к порту. Взаимозависимость факторов каждого этапа развития транспортного узла представлена на рис. 3.

Эффект от повышения объемов переработки контейнеров в транспортном узле при поэтапном развитии факторов перерабатывающей способности элементов  $E_n^f$  можно записать следующим образом:

$$E_n^f = \{ (V_n^{\max(f)} - V_{n-1}^{\max}) \cdot c_{1TEU}^{\text{benefit}} \} + c_{n-1}^{lost} - c_n^f, \quad (3)$$

где  $V_n^{\max(f)}$  — максимальные суточные объемы переработки контейнеров при развитии фактора  $f$  на  $n$ -м этапе ( $n = 1, 2, 3, 4$ ), конт./сут;

$c_{1TEU}^{\text{benefit}}$  — доход от обработки контейнера, у.е./TEU.

Эффект от реализации фактора  $f$  на определенном этапе развития транспортного узла:

$$\rho_{nv}^{Ef} = \frac{E_n^f}{\{ (V_n^{\max} - V_{n-1}^{\max}) \cdot c_{1TEU}^{\text{benefit}} \} + c_{n-1}^{lost} - \sum_{f=1}^k c_n^f}. \quad (4)$$

$\rho_{nv}^{Ef}$  имеет значение от 0 до 1. Реализация фактора с наибольшим значением среди всех факторов  $n$ -го этапа развития транспортного узла имеет наибольший эффект увеличения перерабатывающей способности ТУ относительно затрат. Эффект реализации всех факторов  $n$ -го этапа развития транспортного узла составит:

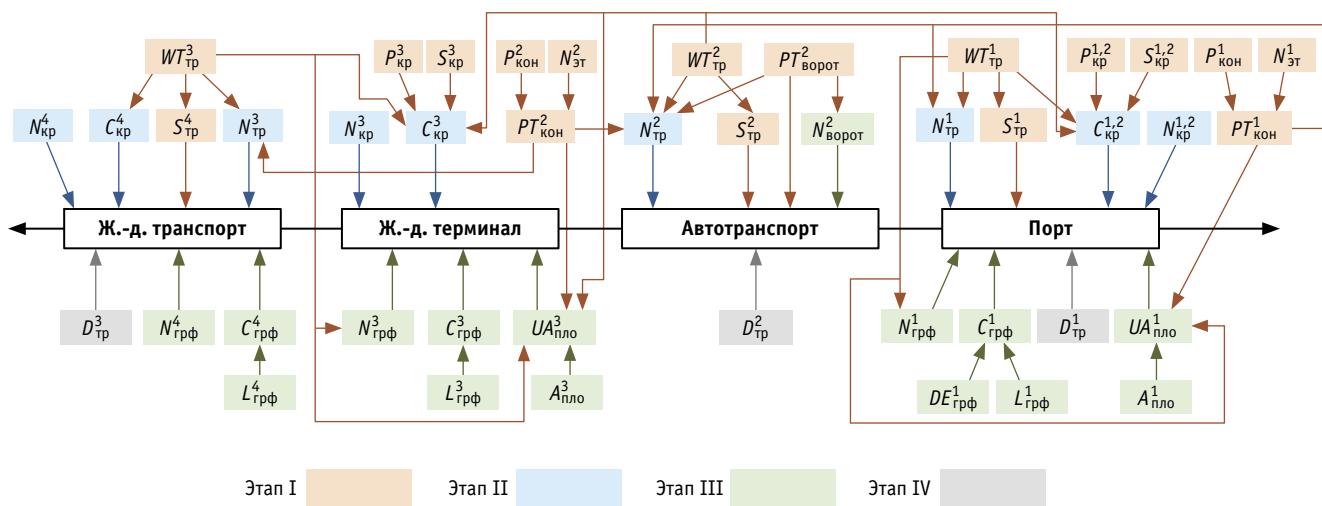


Рис. 3. Взаимозависимость факторов на этапах развития транспортного узла

$$\sum_{f=1}^k p_{nv}^{Ef} = 1 (n=1,2,3,4, v=1,2,3,\dots,7,8).$$

Факторы с высоким значением  $p_{nv}^{Ef}$  должны реализовываться на каждом этапе в первую очередь, что позволит значительно увеличить перерабатывающую способность транспортного узла и получить максимальный эффект финансовых вложений. В настоящее время авторы представленного исследования разрабатывают программу имитационного моделирования этапности развития транспортного узла. Она позволит анализировать уровень влияния факторов среди параметров каждого этапа на степень увеличения перерабатывающей способности элементов транспортного узла и определять максимальный объем принимаемых грузов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По мере увеличения объемов перевозок и потока входящих грузов перерабатывающая способность элементов транспортного узла достигает своего предела. Одни элементы еще имеют определенный резерв перерабатывающей способности, а другие уже не могут принимать транспорт и обрабатывать груз. Поэтому поэтапное развитие транспортного узла является экономически оправданным [12]. В статье предложено четырехэтапное развитие перерабатывающей способности транспортного узла с учетом объема входящих грузов, затрат и периода реализации мероприятий. Первый этап, организационно-технологический, характеризуется минимальными инвестициями в инфраструктуру, далее, по мере увеличения объема поступающих грузов, следуют этапы с серьезными капитальными вложениями — технический и инфраструктурный. После реализации перечисленных этапов и максимального раз-

вития перерабатывающей способности элементов транспортного узла при стабильном увеличении объемов поступающего транспорта и грузов следует предусмотреть строительство нового порта либо организовать для обслуживания ТУ работу «сухого» порта [13].

Транспортный узел Пусан представляет собой совокупность различных собственников инфраструктуры и множества транспортных компаний, при этом он не имеет единого логистического оператора, который должен согласовывать транспортно-технологические параметры перевозки грузов. В Республике Корея причалами порта, терминалами, железной дорогой, автотранспортом владеют разные частные компании. Это существенно осложняет комплексное развитие элементов транспортного узла и эффективную взаимосвязь его объектов при выполнении транспортных и грузовых операций. В настоящее время максимальная суточная перерабатывающая способность железнодорожного транспорта в новом порту Пусан составляет 2240 контейнеров [14]. В то же время, как показал предварительный анализ, после реализации первого этапа развития перерабатывающая способность ТУ может вырасти до 2600 контейнеров в сутки.

В настоящее время южнокорейское правительство рассматривает вопрос по организации межконтинентальных перевозок на основе интеграции железных дорог Республики Корея и КНДР с выходом на азиатско-тихоокеанскую транспортную сеть, что позволит вдвое ускорить доставку товаров в европейские страны и привлечь контейнерные грузы Китая для перевалки в портах Кореи [1]. Поэтому поэтапное развитие элементов транспортных узлов позволит обеспечить обработку прогнозируемого объема поступающих грузов и повысить конкурентоспособность всей транспортной системы Республики Корея.

## Литература

- Покровская О.Д. Исследование эволюции транспортных узлов как логистических объектов // Известия Транссиба. 2017. № 2 (30). С. 146–158. ISSN 2220–4245.
- Ли Т. Е., Король Р. Г. Развитие транспортного узла Пусан для организации транскорейских железнодорожных перевозок // Известия Транссиба. 2021. № 1 (45). С. 122–133. ISSN 2220–4245.
- Новиков П. А. Рациональное взаимодействие железнодорожного и морского транспорта в припортовых транспортных узлах // Транспорт Урала. 2008. № 2 (17). С. 72–75. ISSN 1815–9400.
- Ли Т. Е., Балалаев А. С. Исследование существующих грузопотоков транспортного узла Пусан // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2020. Т. 1. С. 37–42.
- Козлов П. А., Пермикин В. Ю., Кащеева Н. В. К теории транспортных узлов // Транспорт Урала. 2013. № 4 (39). С. 8–10. ISSN 1815–9400.
- Нестерова Н. С., Анисимов В. А. Теоретико-множественная модель мультимодальной транспортной сети // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 26–29. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-26-29. ISSN 1815–9400.
- Рыбин П. К. Особенности оптимизации этапности развития железнодорожных узлов // Транспортные системы: тенденции развития : сборник трудов международной научно-практической конференции. Москва : Изд-во РУТ (МИИТ), 2016. С. 278–281.
- Лебедев А. С., Иванов-Толмачев И. А. Этапность развития железнодорожных станций // Транспортные системы: тенденции развития : сборник трудов международной научно-практической конференции. Москва : Изд-во РУТ (МИИТ), 2016. С. 267–269.
- Бондаренко Н. В., Нестерова Н. С., Гончарук С. М. Методика формирования экономически эффективных стратегий этапного развития Владивостокского мультимодального транспортного узла и его элементов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 2 (50). С. 139–144. ISSN 1813–9108.
- The Final report on research for establishment of master plan on rearrangement of railroad facilities in Busan and plan of development. 2014. Pp. 56–57.
- Король Р. Г. Взаимодействие различных видов транспорта в транспортном узле при наличии терминала «сухой порт» (на примере Владивостокского транспортного узла) : автореферат докторской на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2015. 22 с.
- Фролов В. Ф., Начигин В. А. Процедура выбора предпочтительного сценария развития перевозочного процесса // Известия Транссиба. 2014. № 1 (17). С. 109–115. ISSN 2220–4245.
- Король Р. Г., Дороничев А. В. Функционирование транспортного узла в рамках логистической системы «сухой порт — станция — морской порт» // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2015. № 2 (4). С. 47–49. ISSN 2415–8658.
- Determining values of design parameters for a rail transportation terminal in a container port / B. J. Jeong, B. K. Lee, K. H. Kim [et al.] // Korean institute of industrial engineers. 2007. Pp. 469–478.

## References

- Pokrovskaya O. D. The study of the evolution of transport hubs as logistics facilities [Issledovanie evolyutsii transportnykh uzlov kak logisticheskikh ob'ektov] // Journal of Transsib Railway Studies. 2017. No. 2 (30). Pp. 146–158. ISSN 2220-4245.
- Lee T. Y., Korol R. G. Busan transport hub development for trans-korean railway transportation [Razvitiye transportnogo uzla Pusan dlya organizatsii transkoreyskikh zheleznodorozhnykh perevozok] // Journal of Transsib Railway Studies. 2021. No. 1 (45). Pp. 122–133. ISSN 2220-4245.
- Novikov P. A. Rational interaction of railway and sea transport in port traffic centers [Ratsional'noe vzaimodeystvie zheleznodorozhnogo i morskogo transporta v priportovykh transportnykh uzlakh] // Transport of the Urals. 2008. No. 2 (17). Pp. 72–75. ISSN 1815-9400.
- Lee T. Y., Balalaev A. S. Study of the existing freight traffic of the Busan transport hub [Issledovanie sushhestvuyushikh gruzopotokov transportnogo uzla Pusan] // Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century. 2020. Vol. 1. Pp. 37–42.
- Kozlov P. A., Perminkin V. Yu., Kashcheyeva N. V. Toward transport hub theory [K teorii transportnykh uzlov] // Transport of the Urals. 2013. No. 4 (39). Pp. 8–10. ISSN 1815-9400.
- Nesterova N. S., Anisimov V. A. Set-theoretical model of multimodal transport network [Teoretiko-mnogozhestvennaya model' mul'timodal'noy transportnoy seti] // Transport of the Urals. 2016. No. 2 (49). Pp. 26–29. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-26-29. ISSN 1815-9400.
- Rybin P. K. Features of optimization of the stage-by-stage development of railway junctions [Osobennosti optimizatsii etapnosti razvitiya zheleznodorozhnykh uzlov] // Transport systems: development trends : proceedings of the international scientific and practical conference. Moscow : Publishing House of Russian University of Transport (MIIT), 2016. Pp. 278–281.
- Lebedev A. S., Ivanov-Tolmachev I. A. Stages of development of railway stations [Etapnost' razvitiya zheleznodorozhnykh stantsiy] // Transport systems: development trends : proceedings of the international scientific and practical conference. Moscow : Publishing House of Russian University of Transport (MIIT), 2016. Pp. 267–269.
- Bondarenko N. V., Nesterova N. S., Goncharuk S. M. Methods of forming economically effective strategies for staged development of Vladivostok's multimodal transport hub and its elements [Metodika formirovaniya ekonomicheski effektivnykh strategiy etapnogo razvitiya Vladivostokskogo mul'timodal'nogo transportnogo uzla i ego elementov] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2016. No. 2 (50). Pp. 139–144. ISSN 1813-9108.
- The Final report on research for establishment of master plan on rearrangement of railroad facilities in Busan and plan of development. 2014. Pp. 56–57.
- Korol R. G. The interaction of different modes of transport in transport in the presence of the terminal «dry port» (on the example of Vladivostok transport hub) [Vzaimodeystvie razlichnykh vidov transporta v transportnom uzle pri nalichii terminala «sukhoy port» (na primere Vladivostokskogo transportnogo uzla)] : Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2015. 22 p.
- Frolov V. F., Nachigin V. A. Preferred selection procedure scenario development transportation process [Protsedura vybora predpochtitel'nogo stsenariya razvitiya perevozochnogo protsessa] // Journal of Transsib Railway Studies. 2014. No. 1 (17). Pp. 109–115. ISSN 2220-4245.
- Korol R. G., Doronichev A. V. Operating of transportation hub within the «dry port — station — sea port» logistic system [Funktzionirovaniye transportnogo uzla v ramkakh logisticheskoy sistemy «sukhoy port — stantsiya — morskoy port»] // Transport of the Asia-Pacific region. 2015. No. 2 (4). Pp. 47–49. ISSN 2415-8658.
- Determining values of design parameters for a rail transportation terminal in a container port / B. J. Jeong, B. K. Lee, K. H. Kim [et al.] // Korean institute of industrial engineers. 2007. Pp. 469–478.

Объем статьи 0,73 авторских листа

УДК 656.1

Александр Валериевич Мартыненко, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), старший научный сотрудник Центра развития и размещения производительных сил Института экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УрО РАН), Екатеринбург, Россия,  
 Кирилл Константинович Ваколюк, магистрант кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАССАЖИРОПОТОКОВ В ПРИГОРОДНОМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ СООБЩЕНИИ НА ОСНОВЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И СТРУКТУРЫ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ)

Alexander Valerievich Martynenko, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Senior Researcher, Productive Forces Development and Placement Centre, Institute of Economics, the Ural branch of Russian Academy of Sciences (IE UB RAS), Ekaterinburg, Russia,  
 Kirill Konstantinovich Vakolyuk, graduate student, Stations, Junctions and Freight Work Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Forecasting of passenger traffic in commuter rail operation on the basis of social and economic indicators and structure of land use (on example of Chelyabinsk region)

#### Аннотация

Во многих вопросах, связанных с организацией и планированием перевозок пассажиров в пригородном железнодорожном сообщении, важную роль играет прогнозирование пассажиропотоков на основе доступной информации об их зарождении и поглощении вблизи железнодорожных станций. Для получения такого прогноза чаще всего используют модели прямого спроса, представляющие собой регрессионные зависимости между пассажиропотоком и стоимостью поездки, ее продолжительностью, а также социально-экономическими характеристиками населенных пунктов (численность населения, средний доход, уровень безработицы и т.д.), обслуживаемых железнодорожными станциями.

В статье предлагается подход к моделированию прямого спроса, основанный на методах машинного обучения и использующий в качестве объясняющих переменных не только социально-экономические характеристики, но также геоданные о структуре землепользования в окрестности железнодорожных станций. Рассмотренный подход реализован для пригородного пассажирского сообщения в Челябинской области.

**Ключевые слова:** прогнозирование пассажиропотоков, пригородные пассажирские перевозки, модель прямого спроса, машинное обучение, градиентный бустинг, структура землепользования.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-58-65

#### Summary

In many issues connected with organization and planning of passenger transportation in commuter rail operation an important role has forecasting of passenger traffic based on accessible information about its origin and absorption near railway stations. In order to get such a forecast researchers mostly use models of direct demand that represent regression dependencies between passenger traffic and ride cost, its duration and also social and economic characteristics of settlements (population, average income, unemployment rate and etc.) served by railway stations.

The paper suggests an approach to modeling of direct demand that is based on methods of machine learning and that uses not only social and economic characteristics as explaining variables but also geodata about structure of land use near railway stations. The approach considered is realized for the commuter rail operation in Chelyabinsk region.

**Keywords:** passenger traffic forecasting, commuter traffic, model of direct demand, machine learning, gradient boosting, structure of land use.

## ВВЕДЕНИЕ

Пригородное железнодорожное сообщение играет важную роль в экономике и жизни страны и во многих случаях служит самым надежным, экологичным и доступным транспортом для населения. Однако пригородное железнодорожное сообщение охватывает не все населенные пункты. В связи с этим существует запрос на введение новых маршрутов.

Введение нового маршрута сопряжено с высокими финансовыми издержками. Однако существуют риски, что он окажется недостаточно востребованным. Поэтому на этапе принятия решения о вводе нового маршрута очень важно получить как можно более точный прогноз будущего пассажиропотока.

Традиционно для прогнозирования пассажиропотоков используется либо классическая четырехшаговая транспортная модель, либо так называемая модель прямого спроса (direct demand models). Сравнение этих подходов представлено в обзорной работе [1].

Четырехшаговая транспортная модель подразумевает учет пространственных эффектов, т.е. того, что пассажиропоток на каждом виде транспорта между каждыми двумя пунктами зависит от всех пассажиропотоков на всех видах транспорта между этими двумя и всеми остальными пунктами. Такие пространственные эффекты учитываются с помощью гравитационной модели пассажирских корреспонденций, а распределение по видам транспорта базируется на моделях дискретного выбора. Детальную теоретическую информацию по этому подходу можно найти в [2] и [3], а использование для моделирования конкретных транспортных систем — в работах [4–6] (см. также цитируемую там литературу).

В рамках четырехшаговой модели прогнозирования пассажиропотока на пригородном железнодорожном маршруте необходимо построить транспортную модель для региона (пассажиропотоки между всеми пунктами на всех видах транспорта), калибровка которой требует большого количества различных данных. В частности, необходимы данные о существующих пассажиропотоках на всех видах транспорта. Получение таких данных требует значительных финансовых затрат, которые могут быть сравнимы с потерями от эксплуатации пригородного поезда на невостребованном маршруте. Поэтому использование четырехшаговой модели для прогнозирования пассажиропотока нового пригородного маршрута в большинстве случаев экономически неоправданно.

Альтернативным подходом, не требующим больших объемов разнородных данных, является моделирование прямого спроса. Данный подход не учитывает пространственных эффектов, а базируется на предположении, что железнодорожный пассажиропоток между двумя станциями зависит только от социально-экономических характеристик населенных пунктов, обслуживаемых этими станциями, а также от стоимости и продолжительности поездки между ними. Несмотря на столь ограничительное предположение, модели прямого спроса получили очень широкое применение, особенно при прогнозировании железнодорожного пассажиропотока.

Чаще всего для моделирования используется мультиплексная множественная регрессия, в которой независимыми переменными являются социально-экономические показатели

пунктов отправления и прибытия, а также характеристики видов транспорта, связывающих эти пункты. В качестве примера можно привести модель прямого спроса для внутригородских поездок из работы [7]:

$$Q_{ijph} = \alpha_{ph} Y_i^{\beta_{ph}} P_i^{\gamma_{ph}} E_j^{\delta_{ph}} \prod_m t_{ijph}^{\theta_{phm}} \prod_m c_{ijph}^{\mu_{phm}}, \quad (1)$$

где  $Q_{ijph}$  — количество поездок из района  $i$  в район  $j$  с целью  $p$  в  $h$  часов дня;

$Y_i$  — средний доход жителей района  $i$  (ден. ед.);

$P_i$  — количество жителей района  $i$ ;

$E_j$  — количество рабочих мест в районе  $j$ ;

$t_{ijph}$  — продолжительность поездки из района  $i$  в район  $j$  с целью  $p$  в  $h$  часов дня на транспорте вида  $m$  (ед. времени);

$c_{ijph}$  — стоимость поездки из района  $i$  в район  $j$  с целью  $p$  в  $h$  часов дня на транспорте вида  $m$  (ден. ед.).

Модели прямого спроса в виде регрессии (1) и ее различных модификаций (с другими наборами регрессоров) активно используются для прогнозирования пассажиропотоков на разных видах транспорта как для внутригородских, так и для междугородних поездок. Например, в [8] подобным образом моделируются пассажиропотоки на высокоскоростных поездах в Европе. В работах [9] и [10] мультиплексная регрессия используется для моделирования пассажиропотоков в метрополитенах городов Нанкин и Сеул соответственно. В [11] аналогичные подходы применяются для легкорельсового транспорта, соединяющего крупнейшие города острова Кипр. А в [12] модификация регрессии (1) используется для прогнозирования межрегиональных грузовых перевозок в США.

Наряду с регрессией вида (1) находят применение и другие модели прямого спроса, например множественная вложенная логит-модель (см. [13] и цитированную там литературу). В последние несколько лет стали появляться работы [14–16], в которых для моделирования прямого спроса используются методы машинного обучения. В частности, в [14] алгоритмы машинного обучения применяются для моделирования пассажиропотока на основе таких социально-экономических данных о районах отправления и прибытия, как плотность населения, средний доход, размер домохозяйства, демографическая структура населения и т.п. Подобные модели демонстрируют гораздо более высокое качество и лучше аппроксимируют наблюдаемые данные, чем регрессия или вложенная логит-модель.

Преимущество методов машинного обучения заключается в том, что они способны улавливать сложные зависимости между пассажиропотоками и социально-экономическими характеристиками пунктов отправления и прибытия. Однако при попытке моделировать пригородные железнодорожные пассажиропотоки как этими методами, так и более традиционными регрессионными моделями возникают значительные сложности, связанные с расположением станций. Когда станции находятся в черте крупных населенных пунктов или в непосредственной близости от них, то объем пассажиропотока через станцию напрямую зависит от социально-экономических характеристик (количество жителей, автомобилей в собственности,

Количество пассажиров		Год	Квартал	вание мес	Day	Тип льготы											
		2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	
		1 квартал	1 квартал	1 квартал	1 квартал	1 квартал	1 квартал	1 квартал	1 квартал	1 квартал	1 квартал	1 квартал	1 квартал	1 квартал	1 квартал	1 квартал	
		Март	Март	Март	Март	Март	Март	Март	Март	Март	Март	Март	Март	Март	Март	Март	
		2020-03-01	2020-03-01	2020-03-01	2020-03-01	2020-03-01	2020-03-01	2020-03-01	2020-03-01	2020-03-01	2020-03-01	2020-03-01	2020-03-01	2020-03-01	2020-03-01	2020-03-01	
Название станции	Название станции	номер поезда	ннослуженная стоимость	нник ОАО "Учащийся	нник ОАО "Учащийся	нник ОАО "Учащийся	нник ОАО "Учащийся	нник ОАО "Учащийся	нник ОАО "Учащийся	нник ОАО "Учащийся	нник ОАО "Учащийся	нник ОАО "Учащийся	нник ОАО "Учащийся	нник ОАО "Учащийся	нник ОАО "Учащийся	нник ОАО "Учащийся	
АННЕНСК	ЗАПАСНОЕ	6521															
АННЕНСК	КАРТАЛЫ	6514	4	2		2	3		1		1	3		4		4	
АННЕНСК	КАРТАЛЫ	6518	3		4			2	1								1
АННЕНСК	МАГНИТОГОРСК ДЕП	6515															
АННЕНСК	МАГНИТОГОРСК ДЕП	6521															2
АННЕНСК	МАГНИТОГОРСК-ГР	6515															
АННЕНСК	МАГНИТОГОРСК-ГР	6521															
АННЕНСК	ТОГОРСК-ПАССАЖИ	6515	5	2	5	2						2	1	2	1		
АННЕНСК	ТОГОРСК-ПАССАЖИ	6521										1					
АННЕНСК	МОЧАГИ	6515															
АННЕНСК	МОЧАГИ	6521															
АННЕНСК	НАЧАЛЬНОЕ	6514															
АННЕНСК	3 КМ (МАГНИТОГОРСК)	6515										2					2
АННЕНСК	ПОВОРОТ	6514															
АННЕНСК	СИСТЕМА	6515															
АННЕНСК	СУБУТАК	6515										2					2

Рис. 1. Фрагмент данных об объеме пассажиров, перевезенных Свердловской пригородной компанией в Челябинской области

среднего дохода, уровня безработицы и т.п.) этого населенного пункта. Однако многие железнодорожные станции расположены на значительном удалении от крупных населенных пунктов. В данном случае социально-экономические показатели не играют сколь-нибудь важной роли (более того, они попросту отсутствуют), а пассажиропоток определяется структурой землепользования на территории, которую обслуживает станция, т.е. точками притяжения пассажиропотока являются садовые товарищества, рекреационные зоны, карьеры, кладбища и т.д. Естественно, модель прямого спроса должна это учитывать, а методы машинного обучения позволяют достаточно легко это реализовать.

Цель исследования, представленного в статье, — на основе данных о пригородных железнодорожных пассажиропотоках в Челябинской области за 2020 г. разработать модель прямого спроса, базирующуюся на методах машинного обучения и использующую для прогнозирования социально-экономические характеристики и информацию о структуре землепользования в окрестности железнодорожных станций.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для обучения модели были использованы предоставленные Свердловской пригородной компанией данные об объемах ежедневных пригородных пассажирских перевозок по каждому поезду между всеми парами станций в Челябинской области за 2020 г. (рис. 1).

Данные содержат разбиение по типам билетов в зависимости от тарификации и примененных льгот. Всего представлено 195 станций, которые образуют 3584 пары, между которыми возможно осуществить прямую поездку. В настоящем исследовании были использованы данные о проданных билетах «за полную стоимость», агрегированные по месяцам. Наибольший объем пассажиропотока за год наблюдался между Троицким и Челябинским и составил 48335 чел. Между 270 парами станций прямых поездок за год не совершалось. Между 382 парами станций было перевезено более 500 пассажиров, между 874 парами — от 50 до 500 чел. Железная дорога



Рис. 2. Железнодорожная инфраструктура Челябинской области

в Челябинской области со всеми рассматриваемыми станциями представлена на рис. 2.

В качестве источника геоданных о территории Челябинской области использованы материалы проекта OpenStreetMap [17]. Набор данных содержит векторные слои с различными типами объектов и их детальными характеристиками. В том числе представлены слои, содержащие объекты инфраструктуры (автомобильные и железные дороги, метро и т.п.), точки интереса (супермаркеты, торговые центры, образовательные уч-

реждения и т.п.), остановки общественного транспорта, водные объекты и т.п.

Для нашего исследования особенно интересен слой с типами землепользования. В структуре сервиса они представлены последовательностью точек (relation), образующих многоугольники. Каждый такой объект обладает характеристиками, которые дают возможность идентифицировать и отнести его к тому или иному типу. OpenStreetMap предоставляет подробную информацию, позволяющую учесть более 20 различных типов землепользования. Один из них — производственные территории, к которым относятся не только площади зданий и сооружений, но и все прилегающие к территории предприятия, фермерские угодья (поля, пастбища и т.п.), садовые товарищества, места разработки полезных ископаемых открытым способом и т.д. Пример структуры землепользования в окрестности станции Чебаркуль показан на рис. 3.

## МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Для обучения моделей в качестве объясняющих переменных применялись характеристики территорий вблизи станций, демографические показатели ближайших населенных пунктов, характеристики поездов, а также категориальная переменная для месяца, в котором совершена поездка, преобразованная в дамми-переменные. В целях снижения размерности данных и количества переменных в модели использовались произведения одинаковых характеристик для каждой пары станций. Полный список всех объясняющих переменных приведен в табл. 1.

Для всех станций определена структура землепользования в радиусе 1,6; 5 и 8 км, т.е. вычислены доли, которые занимает в каждом из кругов указанного радиуса каждый следующий тип территории: карьеры, жилая застройка, торговые площади, садоводческие товарищества, деловые районы, железнодорожные станции и охраняемая зона железнодорожных путей, строительные площадки, кладбища, свалки, сельскохозяйственные дворы (поля, пастбища, фермы), гаражные кооперативы, промышленные территории. Пример выделения структуры землепользования для круга с радиусом 8 км представлен на рис. 4.

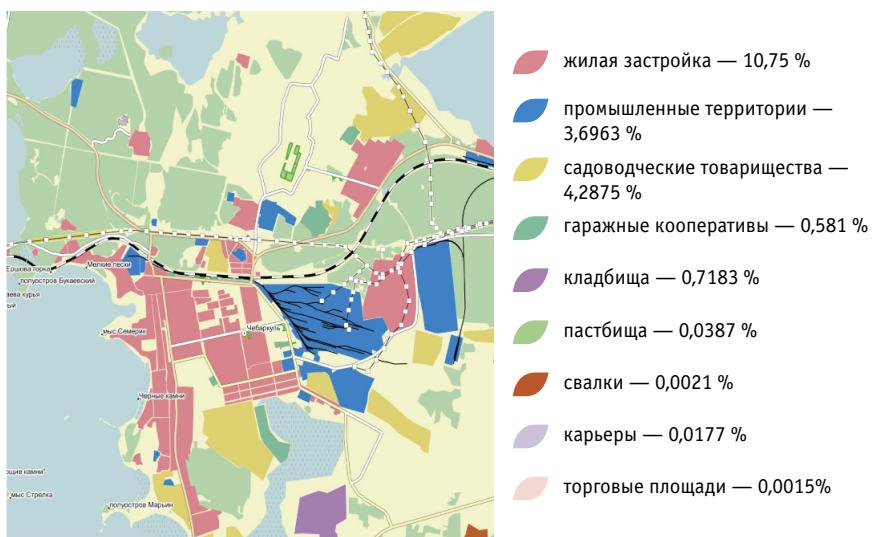


Рис. 3. Структура землепользования в окрестности станции Чебаркуль

Таблица 1

## Объясняющие переменные

1. Характеристики окрестности станции	
P	Численность населения ближайшего к станции населенного пункта
d	Расстояние от станции до ближайшего населенного пункта
landfill	Доля территории, занятой свалками в окрестности станции
garages	Доля территории, занятой гаражными кооперативами в окрестности станции
commercial	Доля территории, занятой деловыми районами в окрестности станции
railway	Доля территории, занятой железнодорожной станцией и охранной зоной железнодорожных путей в окрестности станции
construction	Доля территории, занятой строительными площадками в окрестности станции
allotments	Доля территории, занятой садоводческими товариществами в окрестности станции
farm	Доля территории, занятой фермерскими угодьями в окрестности станции
industrial	Доля территории, занятой промышленными сооружениями в окрестности станции
cemetery	Доля территории, занятой кладбищами в окрестности станции
quarry	Доля территории, занятой карьерами в окрестности станции
residential	Доля территории, занятой жилой застройкой в окрестности станции
retail	Доля территории, занятой торговыми площадями в окрестности станции
2. Характеристики поезда	
departure_time	Время отправления
arrive_time	Время прибытия
comfort_train	Комфортабельность поезда
distance	Расстояние, преодолеваемое на электропоезде
3. Сезонность	
months	Месяц года



Рис. 4. Структура землепользования в радиусе 8 км для некоторых железнодорожных станций

Определение структуры землепользования для различных по площади территорий обусловлено тем, что близость объекта того или иного типа оказывает вариативное влияние на транспортное поведение населения. Например, важность жилой застройки угасает намного быстрее, чем доступность производственных территорий и карьеров. Таким образом, потребитель готов совершать поездки на пригородном поезде, если вблизи (до 1,6 км) его места жительства расположена станция, при этом рабочее место от станции прибытия может находиться намного дальше (до 5 км).

В качестве характеристики поезда использована категориальная переменная, отвечающая за комфортабельность, а также введено три переменных, отвечающих за преодолеваемое расстояние, время отправления и прибытия. Это важные признаки, оказывающие существенное влияние на транспортное поведение населения.

В исследовании была протестирована эффективность как регрессионного анализа, так и различных методов машинного обучения для прогнозирования транспортных потоков.

Создание и машинное обучение моделей производилось на языке программирования Python с применением дополнительных библиотек. Набор данных был перемешан и разделен на тренировочную (70%) и тестовую (30%) выборки. Все рассматриваемые в данном исследовании модели относятся к методам обучения с учителем для задач регрессии. Модели решающего дерева и случайного леса реализованы на основе библиотеки Scikit-learn с установленными гиперпараметрами «по умолчанию». Библиотека Scikit-learn включает в себя реализации алгоритмов, основанные на «классических» подходах, описанных в литературе для решающего дерева [18, 19] и для случайного леса [20, 21].

Также был рассмотрен подход машинного обучения, ставший развитием идеи применения деревьев решений для задач регрессии, а именно ансамблевый метод, основанный на аддитивных функциях в виде суммы деревьев решений. В настоящем исследовании использована реализация градиентного бустинга, представленная в библиотеке LightGBM. В качестве алгоритма создания деревьев решений применен метод DART [22], разработанный компанией Microsoft в 2015 г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование выполнялось на основе нескольких методов. Как следует из полученных коэффициентов детерминации (табл. 2), качество аппроксимации наблюдаемых данных с помощью регрессии крайне низкое, поэтому такая модель не может быть использована для прогнозирования пассажиропотоков. При этом даже без тонкой оптимизации процесса обучения предсказательная способность других методов показывает достаточно хорошие результаты ( $R^2 = 0,77$  для градиентного бустинга на тестовой выборке).

Результат, полученный для градиентного бустинга, был улучшен после оптимизации процесса обучения, достигнутого с помощью перебора различных комбинаций гиперпараметров. Оценка эффективности обучения основывалась на результатах перекрестной проверки (кросс-валидации).

При оптимизации процесса обучения была получена модель прогнозирования пассажиропотока с коэффициентом детерминации 0,84. Визуализация полученного результата на рис. 5 наглядно показывает, что эта модель достаточно хорошо аппроксимирует наблюдаемые данные.

На рис. 6 показано финальное дерево из конечного ансамбля, которое учитывает «опыт» предыдущих деревьев и мини-

Таблица 2

## Результаты моделирования

Модель	Коэффициент детерминации на тренировочной выборке	Коэффициент детерминации на тестовой выборке
Регрессия	0,077	0,075
Решающее дерево	0,742	0,651
Случайный лес	0,809	0,741
Градиентный бустинг	0,815	0,773
Градиентный бустинг с подбором гиперпараметров	0,89	0,842

мизирует их общую ошибку. На листовых узлах указывается функция с порогом разбиения и процентом обучающих данных, попадающих в этот узел. Конечные узлы ( $leaf_i$ ) имеют значения, прогнозируемые для попадающих в них наблюдений.

На рис. 7 представлены 20 наиболее важных переменных, которые участвовали в принятии решения моделью. Здесь важность переменной определяется тем, сколько раз она используется в узлах для разбиения. Итоговая модель в первую очередь опирается на значение преодолеваемого расстояния на поезде, а также на значение произведения расстояний от станций отправления/прибытия до ближайших населенных пунктов. Далее по важности следуют произведение числа жителей в населенных пунктах, расположенных вблизи от станций отправления/прибытия, а также время отправления и прибытия.

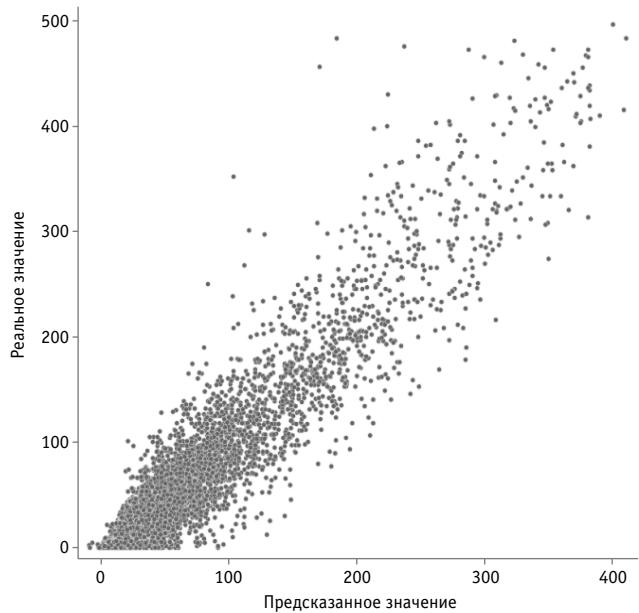


Рис. 5. Результаты модели градиентного бустинга на тестовой выборке

Таким образом, характеристики поезда, а также демографические показатели ближайших населенных пунктов определены моделью как наиболее важные. Но на общую точность модели также сильно влияют переменные, отвечающие за структуру землепользования, и сезонная компонента.

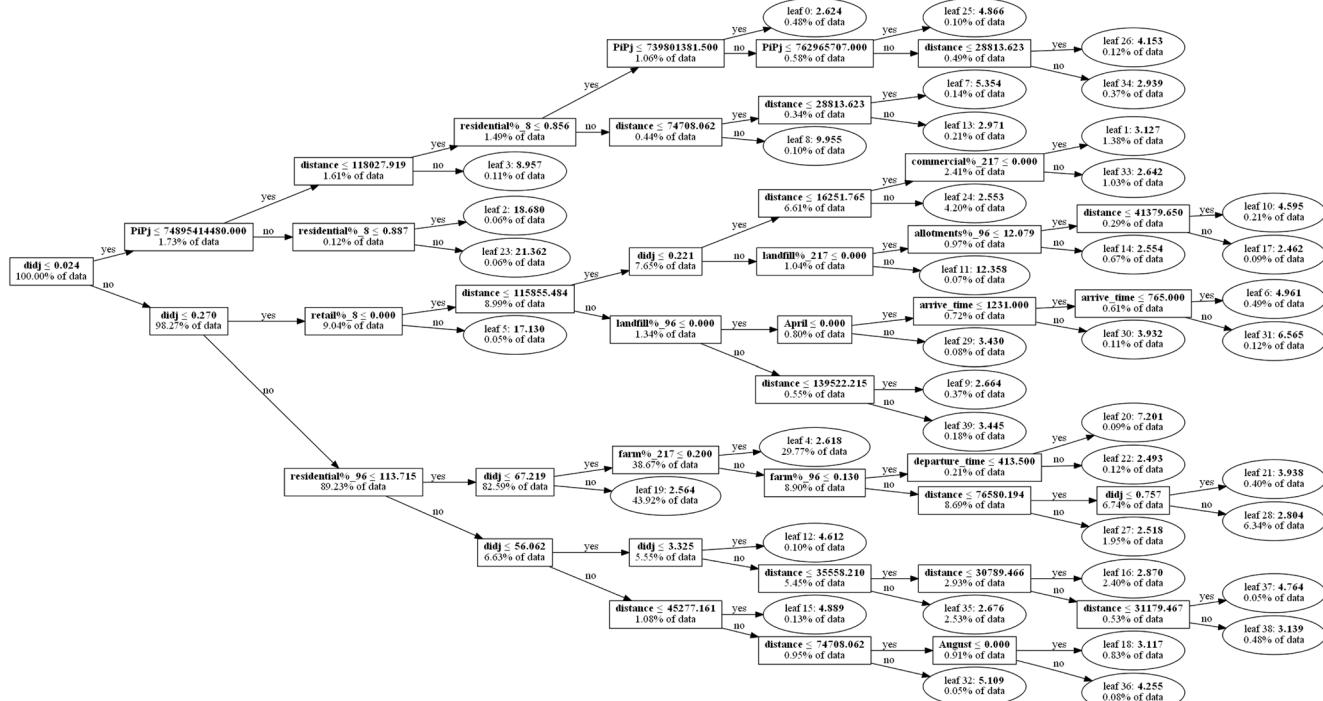


Рис. 6. Финальное решающее дерево в композиции

Переменные

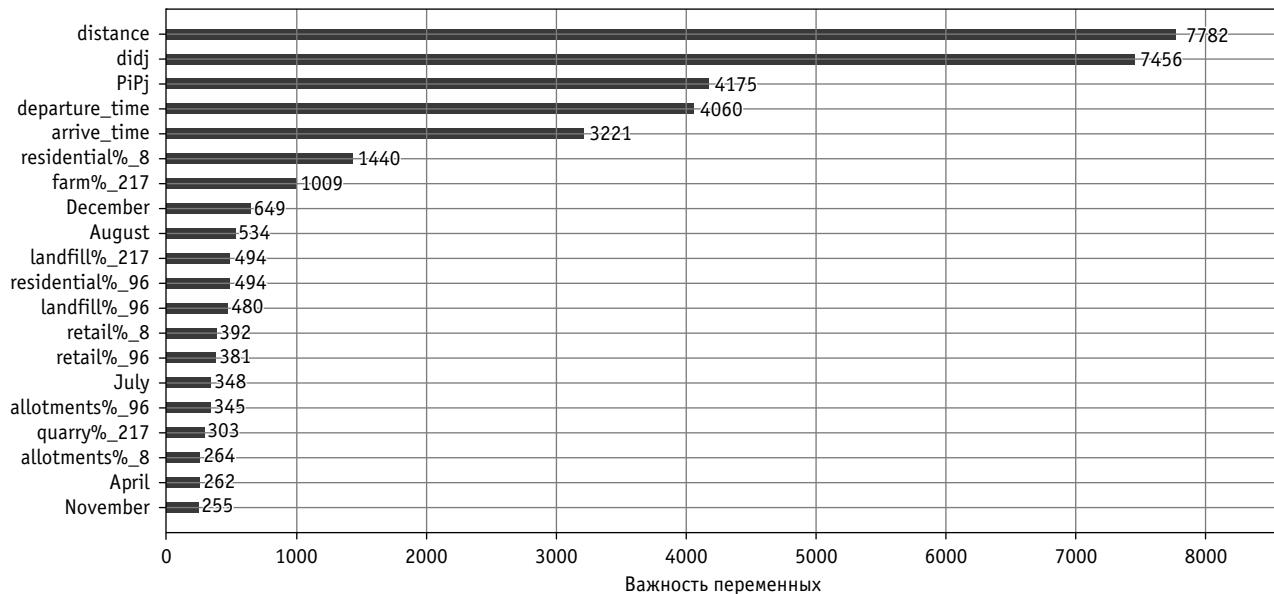


Рис. 7. Важность переменных в модели градиентного бустинга

## Выводы

Исходя из результатов моделей машинного обучения, а также регрессионного анализа, можно сделать вывод, что современные методы машинного обучения значительно превосходят классический подход, основанный на мультиплексионной регрессионной модели. Они обеспечивают достаточно высокую предсказательную способность. При этом наибольшую точность прогнозирования пассажиропотока показали ансамблевые методы с включенными в модель характеристиками структуры землепользования.

Повышение точности прогнозирования пассажиропотоков представляет собой важную задачу, решение которой позволит вводить новые, востребованные населением и экономически обоснованные маршруты. В дальнейших исследованиях предполагается использовать другие современные методы машинного обучения, в первую очередь модели глубокого

обучения. Кроме того, планируется изучить влияние остальных характеристик, влияющих на региональные транспортные потоки, в том числе характеристик конкурирующих видов транспорта: объемы пассажиропотока на поездах дальнего следования внутри региона, количество совместных поездок на личном автотранспорте (карпулинг), объемы автобусного сообщения.

Статья подготовлена в соответствии с планом НИР УрГУПС (НИР, выполняемая в рамках госзадания «Оптимизация транспортно-логистической системы на основе моделирования развития транспортной инфраструктуры и моделей потребительских предпочтений» № 121050500050-5).

Авторы выражают признательность Свердловской пригородной компании за предоставленные статистические данные по пассажирским перевозкам.

## Литература

1. Methodological Options and Data Sources for the Development of Long-Distance Passenger Travel Demand Models: A Comprehensive Review / L. Zhang, F. Southworth, C. Xiong, A. Sonnenberg // Transport Reviews. 2012. Vol. 32. No. 4. Pp. 399–433. DOI: 10.1080/01441647.2012.688174.
2. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. Modelling Transport. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011. 606 p.
3. Введение в математическое моделирование транспортных потоков : учебное пособие / А. В. Гасников, С. Л. Кленов, Е. А. Нурминский [и др.] ; под ред. А. В. Гасникова. Москва : МФТИ, 2010. 360 с.
4. Тимофеева Г. А., Ие О. Н. Применение синтетической гравитационной модели с показательно-степенной функцией тяготения для расчета расщепления пассажиропотока по разным видам

## References

1. Methodological Options and Data Sources for the Development of Long-Distance Passenger Travel Demand Models: A Comprehensive Review / L. Zhang, F. Southworth, C. Xiong, A. Sonnenberg // Transport Reviews. 2012. Vol. 32. No. 4. Pp. 399–433. DOI: 10.1080/01441647.2012.688174.
2. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. Modelling Transport. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2011. 606 p.
3. Introduction to modeling of traffic flows on the basis of equilibrium theory [Vvedenie v modelirovaniye transportnykh potokov na osnove teorii ravnovesiya] : textbook / A. V. Gasnikov, S. L. Klenov, E. A. Nurminskiy [et al.] ; ed. by A. V. Gasnikov. Moscow : Moscow Institute of Physics and Technology, 2010. 360 p.
4. Timofeeva G. A., Ie O. N. Application of synthetic gravity model with exponential-power gravity function for calculation of passenger traffic splitting by different modes of public transport [Primenenie sintetich-

- общественного транспорта // Транспорт Урала. 2020. № 4 (67). С. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-3-9. ISSN 1815-9400.
5. Мартыненко А. В., Филиппова Е. Г. Моделирование пространственного распределения междугородных автомобильных поездок на основе данных сервисов карпулинга // Транспорт Урала. 2021. № 3 (70). С. 33–38. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-33-38. ISSN 1815-9400.
6. Определение пассажиропотоков в региональной транспортной системе на основе модифицированных гравитационных моделей / Е. А. Нурминский, И. Н. Пугачев, Н. Б. Шамрай, В. Н. Седюкевич // Наука и техника. 2015. № 5. С. 39–45. ISSN 2227-1031.
7. Kraft G., Wohl M. New Directions for Passenger Demand Analysis and Forecasting // Transportation Research. 1967. Vol. 1. No. 3.
8. Ashley D. J. Forecasting passenger travel demand — international aspects // Transportation. 1987. Vol. 14. Issue 2. Pp. 147–157.
9. Analysis of Metro ridership at station level and station-to-station level in Nanjing: an approach based on direct demand models / J. Zhao, W. Deng, Y. Song, Y. Zhu // Transportation. 2014. Vol. 41. Issue 1. Pp. 133–155.
10. An analysis of Metro ridership at the station-to-station level in Seoul / J. Choi, Y. Lee, T. Kim, K. Sohn // Transportation. 2012. Vol. 39. Issue 3. Pp. 705–722.
11. Kepartsoglou K., Stathopoulos A., Karlaftis M. Ridership estimation of a new LRT system: Direct demand model approach // Journal of Transport Geography. 2017. Vol. 58. Pp. 146–156. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2016.12.004.
12. A structural direct demand model for inter-regional commodity flow forecasting / F. Ranaiefar, J. Chow, M. McNally, S. Ritchie // Proceedings of 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, DC, 2014.
13. Nazari F., Seyedabishami S., Mamdoohi A. A Direct Demand Model of Departure Time and Mode for Intercity Passenger Trips // International Journal of Transportation Engineering. 2015. Vol. 3. No. 2. Pp. 125–141. DOI: 10.22119/ijte.2015.13840.
14. Alsaleh N., Farooq B. Machine Learning Based Demand Modelling for On-Demand Transit Services. URL: <https://arxiv.org/abs/2010.15673> (дата обращения: 11.08.2021).
15. Chuan D., Xinyu C., Chao L. How does the station-area built environment influence Metrorail ridership? Using gradient boosting decision trees to identify non-linear thresholds // Journal of Transport Geography. 2019. Vol. 77. Pp. 70–78.
16. Xiang Y., Xinyu L., Xilei Z. Using machine learning for direct demand modeling of ridesourcing services in Chicago // Journal of Transport Geography. 2020. Vol. 83.
17. Картографический проект OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org> (дата обращения: 21.06.2021).
18. Classification and Regression Trees / L. Breiman, J. Friedman, R. Olshen, C. Stone. Wadsworth and Brooks, Monterey, CA, 1984.
19. Breiman L., Cutler A. Random Forests. URL: [https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/cc\\_home.htm](https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/cc_home.htm) (дата обращения: 17.08.2021).
20. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. 45 (1). Pp. 5–32.
21. Geurts P., Ernst D., Wehenkel L. Extremely randomized trees // Machine Learning. 2006. 63 (1). Pp. 3–42.
22. Vinayak R., Gilad-Bachrach R. DART: Dropouts meet Multiple Additive Regression Trees // Artificial Intelligence and Statistics. 2015. Pp. 489–497.
- eskoy gravitatsionnoy modeli s pokazatel'no-stepennoy funktsiey tyagoteniya dlya rascheta rasshhepleniya passazhiropotoka po raznym vidam obshhestvennogo transporta] // Transport of the Urals. 2020. No. 4 (67). Pp. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-3-9. ISSN 1815-9400.
5. Martynenko A. V., Filippova E. G. Modeling of spatial distribution of intercity automobile trips on the basis of carpooling services data [Modelirovaniye prostranstvennogo raspredeleniya mezhdugorodnykh avtomobil'nykh poezdok na osnove dannykh servisov karpulinka] // Transport of the Urals. 2021. No. 3 (70). Pp. 33–38. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-33-38. ISSN 1815-9400.
6. Determination of passenger-traffic flows in regional transport system on the basis of modified gravity models [Oprudelenie passazhiropotokov v regional'noy transportnoy sisteme na osnove modifitsirovannykh gravitatsionnykh modeley] / E. A. Nurminskiy, I. N. Pugachev, N. B. Shamray, V. N. Sedyukevich // Science and Technique. 2015. No 5. Pp. 39–45. ISSN 2227-1031.
7. Kraft G., Wohl M. New Directions for Passenger Demand Analysis and Forecasting // Transportation Research. 1967. Vol. 1. No. 3.
8. Ashley D. J. Forecasting passenger travel demand — international aspects // Transportation. 1987. Vol. 14. Issue 2. Pp. 147–157.
9. Analysis of Metro ridership at station level and station-to-station level in Nanjing: an approach based on direct demand models / J. Zhao, W. Deng, Y. Song, Y. Zhu // Transportation. 2014. Vol. 41. Issue 1. Pp. 133–155.
10. An analysis of Metro ridership at the station-to-station level in Seoul / J. Choi, Y. Lee, T. Kim, K. Sohn // Transportation. 2012. Vol. 39. Issue 3. Pp. 705–722.
11. Kepartsoglou K., Stathopoulos A., Karlaftis M. Ridership estimation of a new LRT system: Direct demand model approach // Journal of Transport Geography. 2017. Vol. 58. Pp. 146–156. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2016.12.004.
12. A structural direct demand model for inter-regional commodity flow forecasting / F. Ranaiefar, J. Chow, M. McNally, S. Ritchie // Proceedings of 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, DC, 2014.
13. Nazari F., Seyedabishami S., Mamdoohi A. A Direct Demand Model of Departure Time and Mode for Intercity Passenger Trips // International Journal of Transportation Engineering. 2015. Vol. 3. No. 2. Pp. 125–141. DOI: 10.22119/ijte.2015.13840.
14. Alsaleh N., Farooq B. Machine Learning Based Demand Modelling for On-Demand Transit Services. URL: <https://arxiv.org/abs/2010.15673> (access date: 11.08.2021).
15. Chuan D., Xinyu C., Chao L. How does the station-area built environment influence Metrorail ridership? Using gradient boosting decision trees to identify non-linear thresholds // Journal of Transport Geography. 2019. Vol. 77. Pp. 70–78.
16. Xiang Y., Xinyu L., Xilei Z. Using machine learning for direct demand modeling of ridesourcing services in Chicago // Journal of Transport Geography. 2020. Vol. 83.
17. Cartographic project OpenStreetMap [Kartograficheskiy proekt OpenStreetMap]. URL: <https://www.openstreetmap.org> (access date: 21.06.2021).
18. Classification and Regression Trees / L. Breiman, J. Friedman, R. Olshen, C. Stone. Wadsworth and Brooks, Monterey, CA, 1984.
19. Breiman L., Cutler A. Random Forests. URL: [https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/cc\\_home.htm](https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/cc_home.htm) (access date: 17.08.2021).
20. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. 45 (1). Pp. 5–32.
21. Geurts P., Ernst D., Wehenkel L. Extremely randomized trees // Machine Learning. 2006. 63 (1). Pp. 3–42.
22. Vinayak R., Gilad-Bachrach R. DART: Dropouts meet Multiple Additive Regression Trees // Artificial Intelligence and Statistics. 2015. Pp. 489–497.

УДК 621.436-222-047.38:681.586.773

Алексей Юрьевич Коньков, доктор технических наук, профессор кафедры «Транспорт железных дорог»  
Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия,

Антон Игоревич Трунов, преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания»  
Тихоокеанского государственного университета (ТОГУ), Хабаровск, Россия

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА РЕГУЛИРОВКИ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ДИЗЕЛЯ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ИНДИКАТОРНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

Alexey Yuryevich Konkov, DSc in Engineering, Professor, Railway Transport Department,  
Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia,

Anton Igorevich Trunov, Lecturer, Internal Combustion Engines Department,  
Pacific National University (PNU), Khabarovsk, Russia

### Experimental study of the method for adjusting the fuel system of a diesel engine using the net heat release charts

#### Аннотация

Тонкая регулировка топливоподающей аппаратуры позволяет обеспечить идентичность рабочих процессов во всех цилиндрах дизеля. В статье представлены результаты экспериментальной проверки разработанного авторами метода, использующего только характеристику индикаторного тепловыделения. Метод допускает нестабильность нагружного режима двигателя в процессе испытаний и не требует измерения сигнала давления во всех цилиндрах дизеля одновременно. Помимо задач настройки, в статье показана возможность обнаружения неисправностей форсунок, приводящих к плохому распыливанию топлива.

**Ключевые слова:** дизель, топливоподающая аппаратура, угол опережения подачи топлива, цикловая подача топлива, регулировка, внутрицилиндровое давление, тепловыделение.

#### Summary

Fine adjustment of the fuel injection system makes it possible to achieve the identity of working processes in all cylinders of a diesel engine. The paper presents the results of experimental verification of the method developed and published earlier by the authors, which uses only the chart of net heat release. The method allows instability of the engine load mode during engine tests and does not require measurement of the pressure signal in all engine cylinders simultaneously. In addition to the tuning tasks, the paper shows the possibility of detecting injector malfunctions leading to poor fuel atomization.

**Keywords:** diesel, fuel injection system, fuel injection advance angle, fuel injection mass, fuel system adjustment, in-cylinder pressure, heat release.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-66-73

#### ВВЕДЕНИЕ

Работа многоцилиндрового двигателя с заявленными заводом-изготовителем технико-экономическими показателями возможна только при условии идентичности рабочих процессов во всех цилиндрах. Для дизеля выполнение этого условия достигается регулировкой топливных насосов высокого давления (ТНВД), в ходе которой устанавливается требуемое значение действительного угла опережения подачи топлива (УОПТ) в каждом цилиндре и минимизируется разница цикловых подач (ЦП) по цилиндрям при заданном положении управляющего органа (рейки ТНВД). Тепловозные среднеоборотные дизели оснащаются, как правило, индивидуальными ТНВД, что делает необходимым проведение процедуры настройки в два этапа. Первый этап выполняется в топливном отделении на специальных стендах, второй — непосредственно на двигателе. Недостаточная технологическая дисциплина, отсутствие удобного и универсального инструмента для оперативного контроля качества обеих регулировок на работающем дизеле приводят к тому, что значительная часть находящихся в эксплуатации дизелей нуждается в регулировке. Так, по данным исследования [1], полученным на основе выборочной проверки 600 ТНВД тепловозного дизеля Д49, около 35 % из них нуждались в регулировке УОПТ и 25 % — в регулировке ЦП. Последствия работы с неоптимальным УОПТ хорошо известны: жесткая работа с чрезмерными механическими нагрузками на детали цилиндрапоршневой группы (ЦПГ) при раннем впрыске топлива и неполное сгорание, а следовательно, и связанные с этим экологические проблемы — при позднем впрыске. Во всех случаях происходит повышенный удельный расход топлива. Проблема неравномерной ЦП имеет более скрытый характер. В связи с этим обычно отмечают

только неравномерный износ деталей ЦПГ и снижение максимальных энергетических возможностей двигателя. При этом нередко игнорируется рост тепловой нагрузки на детали ЦПГ в «перегруженных» цилиндрах, которая для высокофорсированных двигателей может стать причиной образования термических трещин в поршне, в крышке цилиндров и в цилиндровой втулке даже при работе на частичных режимах двигателя. В статье [2] показано, что вероятность возникновения трещин из-за высокой теплонапряженности резко увеличивается для двигателей, значительное время работающих на переходных режимах, характерных и для условий эксплуатации тепловозного дизеля. Проблема усугубляется при износе ЦПГ вследствие роста теплоотдачи к стенкам цилиндра и к тронку поршня от газов, прорывающихся через компрессионные кольца [3].

В настоящей работе приводятся результаты опытной проверки разработанного ранее авторами универсального метода регулировки УОПТ и ЦП на основе характеристик тепловыделения [4], а также рассматриваются особенности влияния работы регулятора двигателя на технологию настройки аппаратуры, выявленные в ходе экспериментального исследования.

Необходимо отметить, что экспериментальное определение характеристики тепловыделения (зависимости количества теплоты, выделившейся при сгорании топлива, от фазы цикла) на основе индикаторной диаграммы — чрезвычайно сложная задача, требующая корректного учета таких процессов и особенностей, как конвективный и лучистый теплообмен газа со стенками рабочей камеры; изменение массы и состава рабочего тела при горении; химическая и физическая неполнота сгорания топлива; диссоциация продуктов горения; утечки рабочего тела через уплотнения рабочей камеры. В связи с этим вызывает интерес способ определения теплоты, основанный на интегрировании уравнения первого закона термодинамики для закрытой системы, записанного в следующей форме:

$$dQ_i = \frac{k}{k-1} p \cdot dV + \frac{1}{k-1} V \cdot dp, \quad (1)$$

где  $k$  — показатель адиабаты рабочего тела;

$p$  — давление в цилиндре, Па;

$V$  — объем цилиндра,  $\text{м}^3$ .

Очевидно, что при таком подходе все отмеченные выше особенности рабочего процесса игнорируются, и поэтому теплоту  $Q_i$  нельзя считать теплотой, выделяющейся при сгорании топлива, или тепловыделением при сгорании. Для того чтобы найти значение тепловыделения в принятом смысле этого термина, необходимо было бы добавить к величине  $Q_i$  тепловые эквиваленты указанных выше «потерь». Поэтому в англоязычной технической литературе теплоту, вычисляемую на основе (1), принято называть «теплота нетто» [5]. В отечественной литературе этот термин не используется. Академик Б. С. Стечкин в работе [6] использует понятие «активное тепловыделение». Однако наиболее удачным, на наш взгляд, решением, отражающим особенности определения теплоты  $Q_i$ , является термин «индикаторное тепловыделение», предложенный в [7], который будет использоваться нами далее.

## СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВКИ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ НА ТЕПЛОВОЗЕ

В ходе стендовых испытаний индивидуальных ТНВД в комплекте с форсунками, предварительно проверенными и отрегулированными на опрессовочном стенде, вычисляется требуемая толщина прокладок под корпус ТНВД и ограничивается выход рейки каждого ТНВД с целью достижения допустимых значений отклонений для всех насосов дизеля (или ряда цилиндров дизеля) ЦП при подачах на номинальном режиме и режиме холостого хода [8]. Точное выполнение этих работ не является достаточным условием правильной регулировки. После установки ТНВД и форсунок на двигатель необходимо проверить и при необходимости отрегулировать толщину прокладок, определяющую фактический УОПТ, и механизм соединения индивидуальных реек ТНВД с общей рейкой регулятора, определяющий в итоге ЦП в данном цилиндре. Заводы-изготовители предлагают оценивать идентичность рабочего процесса по двум диагностическим параметрам: температуре газов на выходе из цилиндра и по максимальному давлению сгорания в цилиндре при реостатных испытаниях на режиме номинальной мощности [8, 9]. Температура определяется с помощью штатного комплекта термопар, а максимальное давление в цилиндре при сгорании — с помощью максиметра, устанавливаемого через индикаторный кран.

Хотя величина максимального давления сгорания в большей степени зависит от УОПТ, а температура газов от ЦП, все же имеет место влияние каждой регулировки на оба диагностических параметра. Поэтому процедура точной регулировки топливной аппаратуры на дизеле требует специальных навыков и значительных затрат времени. Кроме того, применение одного максиметра для последовательной проверки давления во всех цилиндрах двигателя приводит к трудностям обеспечения постоянного нагружочного режима работы дизеля, что вносит ошибку в определении максимального давления сгорания.

К числу возможных решений проблемы относится одновременное измерение давления во всех цилиндрах дизеля. С этой целью диагностический комплекс «Магистраль» [10] комплектуется 16 датчиками внутрицилиндрового давления. Очевидные недостатки такого решения — высокая стоимость комплекса и необходимость периодической калибровки всех его измерительных каналов. Кроме того, из-за разветвленной кабельной системы и большого числа датчиков такой подход исключает возможность разработки портативных, удобных для работы «в одно лицо» диагностических средств.

Этого недостатка лишен подход профессора Д. Хаунталуса и его соавторов [11], предложенный для настройки мощных дизель-генераторов электростанций и морских судов. Основная идея заключается в применении двух датчиков внутрицилиндрового давления, один из которых установлен на индикаторном кране опорного (например, первого) цилиндра, а второй последовательно устанавливается на остальные цилиндры. Полученные при этом пары индикаторных диаграмм используются как целевые функции при математическом моделировании рабочих процессов с определением целого ряда параметров, включая фактический УОПТ и ЦП. И хотя профессор Д. Хаунталус не употребляет термин «идентификация» при

описании предложенного метода, на наш взгляд, сущность предлагаемого метода полностью соответствует принципам параметрической идентификации, подробно рассмотренным в монографии [12]. По нашему опыту использование даже нульмерных математических моделей рабочего процесса для идентификации параметров дизеля сопряжено со значительными вычислительными затратами, трудно поддающимися полной автоматизации. Кроме того, помимо индикаторной диаграммы, для корректной идентификации нужных диагностических параметров может потребоваться измерение дополнительных величин (давления, температуры наддувочного воздуха и т.п.).

Предложенный нами в работе [4] метод изначально разрабатывался в рамках идеи его последующей практической реализации в составе компактного диагностического прибора, программное обеспечение которого должно оперативно (возможно, в режиме реального времени) определять настроочные параметры для регулировки УОПТ и ЦП. Его суть заключается в попарном, синхронном измерении диаграмм внутрицилиндрового давления с последующим сравнением характеристик индикаторного тепловыделения, полученных численным интегрированием уравнения (1). Сравнение производится с использованием двух параметров: прироста индикаторного тепловыделения в цикле  $\Delta Q_i$  и угла  $\varphi_{Q20}$ , соответствующего положению вала при достижении 20% от этого прироста. Далее определяются направления и величины корректирующих воздействий для каждого цилиндра. При этом по параметру  $\varphi_{Q20}$  выполняется корректировка УОПТ, а по параметру  $\Delta Q_i$  — корректировка ЦП (рис. 1).

Необходимо отметить важную для цели настоящего исследования особенность, а именно существенное влияние процессов в индикаторном канале на результаты определения внутрицилиндрового давления, приводящую к тому, что вместо монотонно возрастающей характеристики тепловыделения имеют место участки с фиктивными колебаниями тепловыделения в начале сгорания (см. рис. 1). Одна из задач исследования заключалась в проверке работоспособности предлагаемого метода в условиях, близких к эксплуатационным.

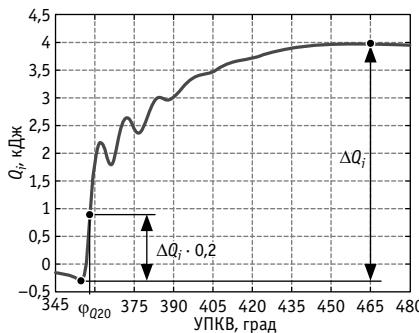


Рис. 1. Характеристика индикаторного тепловыделения и параметры настройки УОПТ и ЦП:  
УПКВ — угол поворота коленчатого вала

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА

Проверку метода выполняли на лабораторной установке с двигателем 6ЧН16/22,5 (6L160PNS, Skoda, Чехословакия), основные технические характеристики которого приведены в табл. 1.

Внутрицилиндровое давление измеряли на режиме частичного нагружения дизеля при частоте вращения коленчатого вала  $n = 700 \pm 20 \text{ мин}^{-1}$  и эффективной мощности  $P_e = 90 \pm 3 \text{ кВт}$ . Параметры быстропеременных процессов регистрировали на частоте 60 кГц с применением персонального компьютера и внешнего модуля аналого-цифрового преобразователя L-CARD E440 (000 «Л Кард», Россия).

Помимо измерения давления в цилиндрах двигателя с помощью двух датчиков давления ДДГ200/700 (НПК «Гарант», Россия) дополнительно регистрировались деформации трубопровода высокого давления топливоподающей аппаратуры и тем-

пературы отработавших газов. Скоростной режим контролировали по показаниям штатного тахометра, а нагрузочный — по величине крутящего момента на гидротормозе. Деформации трубопроводов измеряли накладным пьезоэлектрическим датчиком AVL KG8 (AVL, Австрия). Температура отработавших газов на выходе из цилиндров измерялась хромель-копелевыми термопарами комплекта К-69001 (АО «Электроприбор», Армения).

При регистрации параметров рабочих процессов дизеля записывались 100 последовательных рабочих циклов двигателя. В ходе последующей цифровой обработки выполнялись фильтрация сигнала методом скользящего среднего и разделение массива данных на одноцикловые диаграммы. Позиционирование одноцикловых диаграмм относительно верхней мертвоточки выполнено с использованием диаграммы сжатия-расширения по методике, описанной в [13]. Корректировка абсолютного давления в цилиндре осуществлялась по показателю политропы сжатия [14]. Далее одноцикловые индикаторные диаграммы обрабатывались по известным методикам с целью получения характеристик индикаторного тепловыделения  $Q_i(\varphi)$ , определения среднего индикаторного давления  $p_{mi}$ , максимального давления сгорания  $p_{max}$  и угла  $\varphi_{Q20}$  с последующим осреднением для всех циклов.

## МЕЖЦИКЛОВАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ

Известно, что для рабочих процессов дизеля характерна межцикловая нестабильность внутрицилиндровых процессов, которая может выражаться в непо-

Таблица 1

Основные параметры двигателя 6ЧН 16/22,5

Номинальная частота вращения коленчатого вала, $\text{мин}^{-1}$	750
Номинальная мощность, кВт	140
Тактность	Четырехтактный
Диаметр цилиндра, мм	160
Ход поршня, мм	225
Степень сжатия	13,5
Топливоподающая аппаратура	Рядный механический насос Motorpal PV6Z13L525e889, форсунка с пружинным запиранием, распылитель Motorpal D0150S825 (8×0,25×150)
Камера сгорания	Гессельман
Индикаторный канал (длина×диаметр), мм	280×6

стоянстве от цикла к циклу значений угла начала горения топлива и количества топлива, сгорающего в цикле. Основные причины возникновения этой нестабильности обусловлены особенностями работы топливоподающей аппаратуры, регулятора и протекания процессов топливоподачи и смесеобразования в отдельных циклах [15].

Имеющие место нестабильность момента воспламенения топлива и нестабильность ЦП для исследуемого двигателя можно оценить по одноцикловым индикаторным диаграммам и интегральным характеристикам индикаторного тепловыделения. На рис. 2 показаны одноцикловые диаграммы внутрицилиндрового давления (а) и полученные при их обработке диаграммы индикаторного тепловыделения (б), измеренные при работающем регуляторе частоты вращения для 100 последовательных циклов и наложенные друг на друга.

Анализ представленных диаграмм позволяет сделать вывод, что изменение угла начала видимого горения находится в пределах  $1^\circ$  поворота коленчатого вала ( $^\circ\text{ПКВ}$ ), максимальное давление сгорания изменяется в пределах 10 %, в то время как прирост индикаторного тепловыделения от цикла к циклу изменяется в пределах 40 %, что характеризует этот параметр как более чувствительный к изменениям ЦП.

При работе двигателя под управлением регулятора частоты вращения возникает перераспределение мощности между цилиндрами, которое происходит в результате работы регулятора частоты вращения. Это можно увидеть при обработке последовательных рабочих циклов. На рис. 3 показано, как изменяется приращение индикаторной теплоты  $\Delta Q_i$  в 100 последовательных циклах, синхронно измеренных в цилиндрах 2 и 5, при неизменном нагружочном и скоростном режиме работы двигателя. Видно, что в процессе работы двигателя прирост индикаторного тепловыделения  $\Delta Q_i$  в цилиндре 2 возрастает с 4,8 до 6,7 кДж, а в цилиндре 5 снижается с 6 до 4,7 кДж. Кроме отмеченных переходов прироста индикаторного тепловыделения  $\Delta Q_i$  с одного уровня на другой, наблюдаются менее масштабные колебания, которые вызваны нестабильностью протекания ра-

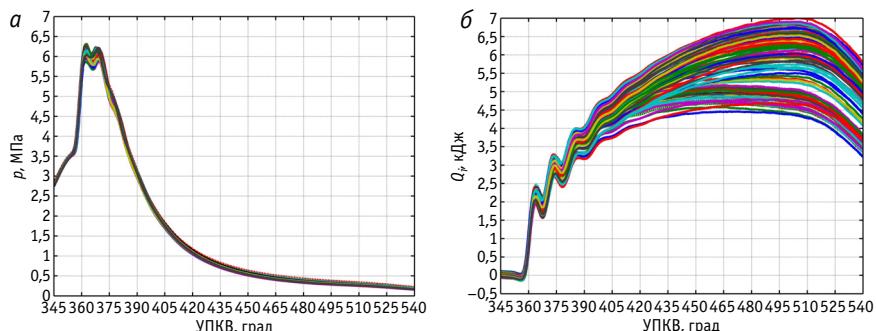


Рис. 2. Влияние межцикловой нестабильности рабочих процессов дизеля на диаграммы внутрицилиндрового давления (а) и характеристики индикаторного тепловыделения (б)

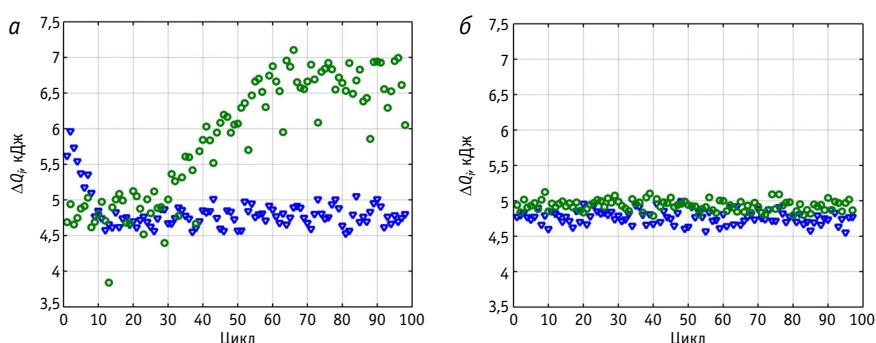


Рис. 3. Изменение индикаторного тепловыделения в последовательных циклах при включенном (а) и отключенном (б) регуляторе:  
● — цилиндр 2; ▽ — цилиндр 5

бочих процессов двигателя. На рис. 3б показано изменение прироста индикаторного тепловыделения  $\Delta Q_i$  в 100 последовательных циклах, синхронно измеренных в цилиндрах 2 и 5, при отключенном регуляторе частоты вращения и зафиксированном положении рейки ТНВД. Можно отметить, что межцикловые изменения прироста индикаторного тепловыделения  $\Delta Q_i$ , вызванные особенностями протекания отдельных циклов, составляют около 10 % для исследуемого режима.

Выявленные особенности позволяют говорить о невозможности выполнения регулировок ЦП по одноцикловым характеристикам, в связи с чем возникает вопрос о минимально возможном количестве циклов для осреднения. Для ответа на этот вопрос было исследовано влияние количества циклов, по которым выполняется осреднение, на расхождение между приростом индикаторной теплоты  $\Delta Q_i$  в цилиндрах 2 и 5 (рис. 4).

Полученная зависимость показывает на стабилизацию расхождения между приростами индикаторного тепловы-

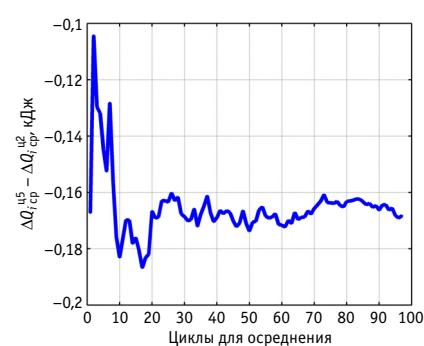


Рис. 4. Расхождение между приростом индикаторного тепловыделения в цилиндрах 2 и 5 в зависимости от количества усредняемых циклов при отключенном регуляторе

деления после 20 циклов, что позволяет рекомендовать осреднение параметров минимум по 20 рабочим циклам.

## РЕГУЛИРОВКА УГЛА ОПЕРЕЖЕНИЯ ПОДАЧИ ТОПЛИВА

Согласно предлагаемой методике регулировка ТНВД на двигателе осуществляется в два этапа. На первом выполняется

настройка УОПТ, на втором — настройка ЦП топлива в отдельных секциях ТНВД.

В практике диагностирования дизелей широкое распространение получил способ определения УОПТ, который базируется на сигнале давления топлива в трубопроводе высокого давления топливоподающей аппаратуры. Характер изменения давления в форсуночной трубке может быть качественно оценен по ее деформации, а его анализ позволяет определить не только начало нагнетательного хода плунжера, но и начало открытия клапана (иглы) форсунки. Рис. 5 показывает хорошее согласование фазовых отклонений, выявляемых как по характеру изменения давления топлива, так и по характеристике индикаторного тепловыделения. В частности, видно, что поздняя подача топлива в 4-м цилиндре (по сравнению с другими цилиндрами) на 10 °ПКВ приводит к аналогичному (на 10 °ПКВ) запаздыванию начала индикаторного тепловыделения. На рис. 5а показаны диаграммы давления топлива в трубке высокого давления топливоподающей аппаратуры в условных единицах.

В работах, посвященных системам управления двигателем с обратной связью по внутрицилиндровому давлению [16, 17], обычно для корректировки УОПТ предлагают использовать угол, при котором выделяется 50% теплоты цикла, т.е.  $\varphi_{Q50}$ . Однако при измерении внутрицилиндрового давления через индикаторный кран значения этого параметра будут существенно искажены вследствие волновых процессов в индикаторном канале, как это было отмечено выше.

Исходя из результатов анализа характеристик индикаторного тепловыделения (рис. 5б) по параметру  $\varphi_{Q20}$  были определены значения корректирующих воздействий на УОПТ для каждой секции ТНВД (табл. 2).

Таблица 2

Значения корректирующих воздействий на УОПТ

Секция ТНВД	1	2	3	4	5	6
$\Delta\varphi_{\text{кор.}}$ , °ПКВ	0	-2,5	-1,5	-11	0	-2

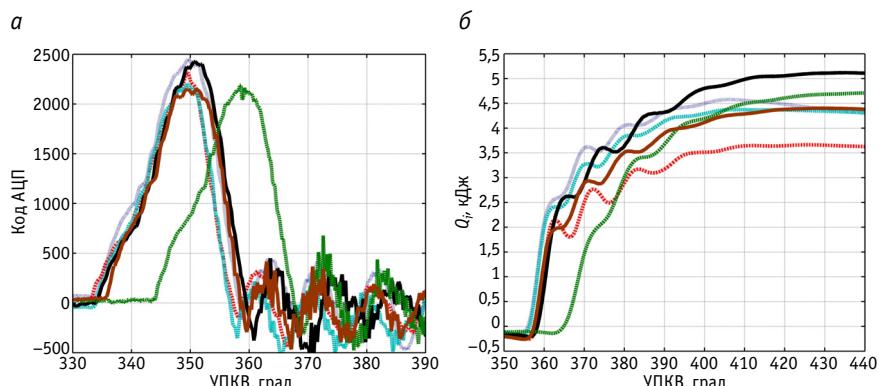


Рис. 5. Диаграммы давления топлива (а) и характеристики индикаторного тепловыделения (б) в цилиндрах дизеля до регулировки УОПТ:

— цилиндр 1; — цилиндр 2; — цилиндр 3;  
— цилиндр 4; — цилиндр 5; — цилиндр 6

Величина корректирующего воздействия вычислялась как разница значений в эталонном и проверяемом цилиндрах:

$$\Delta\varphi_{\text{кор.}} = \varphi_{Q20}^{\text{эт}} - \varphi_{Q20}^{\text{д}}, \quad (2)$$

где  $\Delta\varphi_{\text{кор.}}$  — величина корректирующего воздействия на УОПТ;

$\varphi_{Q20}^{\text{эт}}$  — эталонное значение параметра;

$\varphi_{Q20}^{\text{д}}$  — действительное значение параметра.

При определении величины корректирующих воздействий в качестве эталона были выбраны цилиндры 1 и 5 (см. рис. 5б), так как их значения совпадают и близки к паспортному.

Регулировка углов опережения подачи топлива выполнялась непосредственно на двигателе с помощью стробоскопа, осветитель которого включался по переднему фронту сигнала давления топлива (деформации трубопровода). После внесения требуемых корректировок по секциям был увеличен общий УОПТ на 1,5° ПКВ для его приведения в соответствие с инструкцией по эксплуатации двигателя.

Характеристики индикаторного тепловыделения, полученные после регулировки всех секций, показаны на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что сгорание во всех цилиндрах двигателя начинается в одной и той же фазе рабочих циклов, разброс угла  $\varphi_{Q20}$  не превышает 1° ПКВ, при этом видны значительные расхождения в приросте индикаторного тепловыделения в разных цилиндрах.

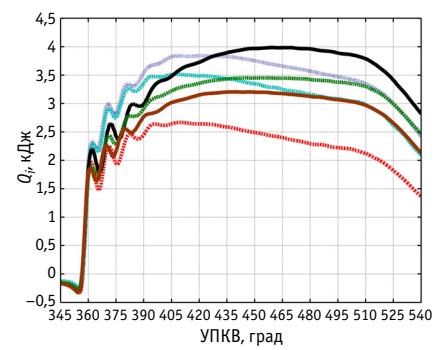


Рис. 6. Характеристики индикаторного тепловыделения после регулировки УОПТ:

— цилиндр 1; — цилиндр 2;  
— цилиндр 3; — цилиндр 4;  
— цилиндр 5; — цилиндр 6

## РЕГУЛИРОВКА ЦИКЛОВОЙ ПОДАЧИ

Регулировка ЦП топлива осуществляется при попарном, синхронном измерении диаграмм внутрицилиндрового давления в эталонном и требующем регулировки цилиндрах с последующей обработкой для вычисления прироста индикаторного тепловыделения в цикле  $\Delta Q_i$ .

Рассмотрим настройки ЦП на примере цилиндра 2. В качестве эталонной выбрана 5-я секция ТНВД. На рис. 7 показаны характеристики индикаторного тепловыделения в цилиндрах 2 и 5, осредненные по 50 циклам, до (а) и после (б) увеличения объема впрыскиваемого топлива секцией 2.

После настройки ЦП в цилиндре 2 было выполнено сравнение предлагаемого метода с методами, получившими на сегодняшний день наибольшее распространение в эксплуатации (табл. 3).

При анализе данных табл. 3 можно отметить, что в цилиндре 2, несмотря на увеличение ЦП, произошло снижение максимального давления сгорания. Это объясняется изменением характера протекания процесса сгорания, в связи с чем изменилась и волновая картина процессов в индикаторном канале, что внесло искажения в результаты определения максимального давления сгорания на конце индикаторного канала. Изменение объема ЦП мало повлияло на температуру отработавших газов цилиндра 2, что говорит о низкой чувствительности данного параметра. Можно отметить, что прирост индикаторного тепловыделения цикла  $\Delta Q_i$  хорошо согласуется со средним индикаторным давлением.

### ВЛИЯНИЕ НЕИСПРАВНОСТИ РАСПЫЛИТЕЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКУ ИНДИКАТОРНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

Для оценки влияния неисправностей топливоподающей аппаратуры на характеристику тепловыделения в цилиндр 2 был установлен распылитель с увеличенными диаметрами распыливающих отверстий ( $8 \times 0,4 \times 140^\circ$ ). В ходе обработки диаграмм, синхронно измеренных в цилиндрах 2 и 5, получены характеристики индикаторного тепловыделения, показанные на рис. 8а.

Как видно из представленных характеристик, увеличение площади проходного сечения распылителя в цилиндре 2 привело к увеличению прироста индикаторной теплоты цикла  $\Delta Q_i$ , что вызвано ожидаемым увеличением ЦП из-за снижения гидравлического сопротивления при неизменном нагнетательном ходе плунжера. В то же время характеристика индикаторного тепловыделения во втором цилиндре стала более пологой (с меньшей скоростью тепловыделения в фазе основного горения), что можно объяснить неизбежным увеличением среднего диаметра капель распыленного топлива и, как следствие, снижением скорости образования паров топлива и перераспределением между долями теплоты, выделившимися в фазах кинетического и диффузационного горения. Для устранения различий в приросте инди-

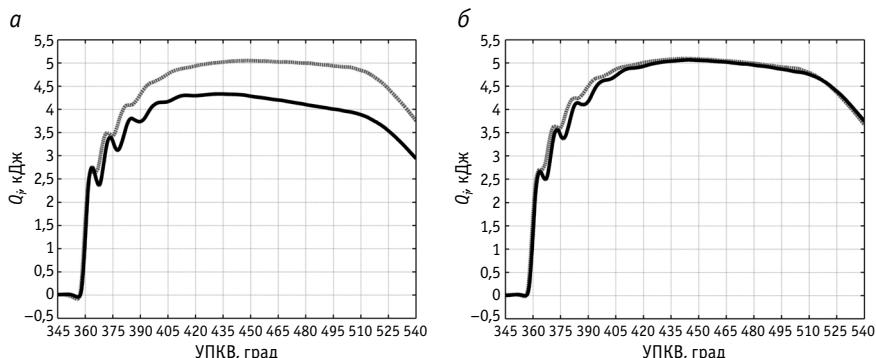


Рис. 7. Зависимость индикаторного тепловыделения от угла поворота коленчатого вала до (а) и после (б) настройки ЦП топлива:  
 — цилиндр 2; ········· цилиндр 5

Таблица 3

Сравнение предлагаемой методики со стандартными методами

Параметр	Цилиндр 5 (эталонный)		Цилиндр 2 (настраиваемый)	
	До настройки ЦП	После настройки ЦП	До настройки ЦП	После настройки ЦП
$\Delta Q_i$ , кДж	5,09	5,09	4,34	5,06
$p_{\max}$ , МПа	6,31	6,37	6,41	6,35
$T_{\text{ог}}$ , °С	310	310	295	300
$p_{\min}$ , МПа	0,6337	0,6418	0,5439	0,6248

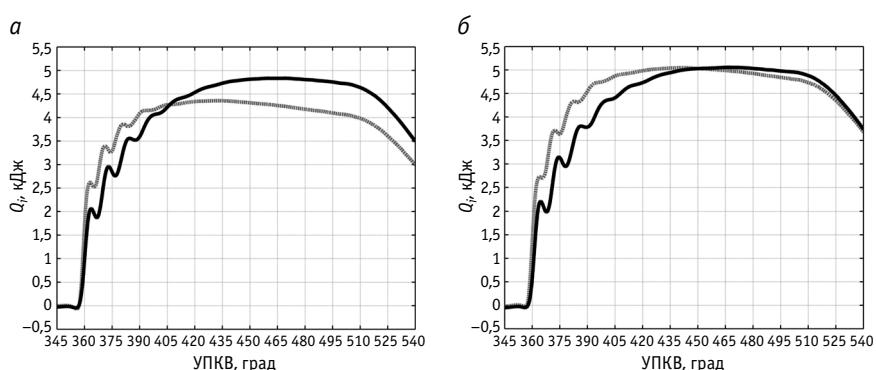


Рис. 8. Зависимость индикаторного тепловыделения от угла поворота коленчатого вала до (а) и после (б) настройки ЦП с неисправным распылителем в цилиндре 2:  
 — цилиндр 2; ········· цилиндр 5

каторной теплоты за цикл было выполнено необходимое уменьшение объема ЦП топлива в цилиндре 2. Как видно из рис. 8б, после выравнивания параметров  $\Delta Q_i$  в цилиндрах 2 и 5 отмеченное выше отличие в скоростях тепловыделения сохранилось, что позволяет наряду с регулировкой аппаратуры предложенным методом выявлять также и ряд неисправностей дизеля, связанных с ухудшением сгорания топлива.

### ВЫВОДЫ

- Предложенные параметры прироста индикаторного тепловыделения в цикле  $\Delta Q_i$  и угол  $\varphi_{Q20}$ , определяемые по характеристикам индикаторного тепловыделения, позволяют достоверно и с высокой чувствительностью находить корректирующие воздействия для регулировок ЦП и УОПТ соответственно.
- Искажения характеристик, вносимые индикаторным каналом, не оказывают

критического влияния на результаты настройки топливной аппаратуры предлагаемым методом, что позволяет рекомендовать его применение в условиях рядовой эксплуатации тепловозных дизелей.

3. Стандартная методика регулировки, основанная на контроле температуры газов за цилиндрами и максимальном давлении сгорания в цилиндрах, не может обеспечить сопоставимый с предлагаемым методом уровень качества настройки в силу ряда причин, к которым относятся низкая чувствительность температуры к цикловой подаче топлива и ошибки определения максимального давления в цилиндрах, возникающие вследствие влияния обоих регулируемых параметров на характер волнового процесса в индикаторном канале.

4. Использование двух датчиков внутрицилиндрового давления позволяет реализовать предлагаемый метод при разработке компактных и относительно недорогих инструментов

для тонкой настройки топливной аппаратуры дизеля в условиях машинного отделения тепловоза.

5. Даже при синхронной записи сигналов давления в двух сравниваемых цилиндрах работа регулятора частоты вращения затрудняет корректную оценку в них индикаторного тепловыделения, равно как и других параметров, определяемых по сигналу давления. В связи с этим наилучшие результаты настройки будут достигнуты при кратковременном отключении регулятора в процессе записи давления в текущей паре цилиндров дизеля. Количество циклов, сохраняемых при этом для последующей обработки, должно быть не менее 20.

6. Экспериментально доказано, что наряду с возможностью тонкой регулировки топливной аппаратуры предлагаемый метод обладает потенциальной возможностью для обнаружения неисправностей дизеля, приводящих к ухудшению распыливания и сгорания топлива. Эта особенность требует дальнейшего исследования.

## Литература

- Конькова И. Д. Диагностирование тепловозного дизеля по сигналу скорости изменения внутрицилиндрового давления : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Хабаровск, 2021. 154 с.
- Тузов Л. В., Брежнев В. И. Анализ теплонапряженности судовых дизелей // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2012. № 4 (16). С. 30–36. ISSN 2309–5180.
- Жуков В. А., Мельник О. В., Тузов Л. В. Влияние износа деталей цилиндрапоршневой группы дизеля на температурное состояние поршня // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2018. № 5 (51). С. 1040–1052. ISSN 2309–5180.
- Коньков А. Ю., Трунов А. И., Гурьянова А. Д. Метод регулировки топливной аппаратуры тепловозного дизеля по характеристике тепловыделения в условиях эксплуатации // Вестник ВНИИЖТ. 2021. № 80 (1). С. 20–29. ISSN 2223–9731.
- Brunt M., Rai H., Emtage A. The Calculation of Heat Release Energy from Engine Cylinder Pressure Data // SAE Technical Paper 981052, 1998.
- Стечкин Б. С., Генкин К. И., Золотаревский В. С. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстрогоходного поршневого двигателя. Москва : АН СССР, 1960. 199 с.
- Стефановский Б. С., Скобцев Е. А., Корси Е. К. Испытания двигателей внутреннего сгорания. Москва : Машиностроение, 1972. 368 с.
- Федотов Г. Б., Левин Г. И. Топливные системы тепловозных дизелей. Ремонт, испытание, совершенствование. Москва : Транспорт, 1983. 192 с.
- Дизель-генератор 1A-9ДГ исп. 3. Руководство по эксплуатации 1A.9ДГ.62Р.
- Васин П. А. Для диагностики тепловоза — комплекс «Магистраль» // Локомотив. 2001. № 7. С. 27–31. ISSN 0869–8147.
- Evaluation of a New Diagnostic Technique to Detect and Account for Load Variation during Cylinder Pressure Measurement of Large-Scale Four-Stroke Diesel Engines / D. Hountalas, A. Antonopoulos, G. Zovanos, R. Papagiannakis // SAE Technical Paper 2012-01-1342, 2012.

## References

- Konkova I. D. Diagnostics of a locomotive diesel engine by a signal of the rate of change of intracylinder pressure [Diagnostirovaniye teplovoznogogo dizelya po signalu skorosti izmeneniya vnutrilsilindrovogo davleniya] : PhD in Engineering Thesis. Khabarovsk, 2021. 154 p.
- Tuzov L. V., Brezhnev V. I. Analysis of thermal stress diesel engines [Analiz teplonapryazhennosti sudovykh dizeley] // Bulletin of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. 2012. No. 4 (16). Pp. 30–36. ISSN 2309-5180.
- Zhukov V. A., Melnik O. V., Tuzov L. V. The influence of the wear of diesel's cylinder group on the temperature state of piston [Vliyanie iznosa detaley tsilindroprishhevoy gruppy dizelya na temperaturnoe sostoyanie porshnya] // Bulletin of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. 2018. No. 5 (51). Pp. 1040–1052. ISSN 2309-5180.
- Konkov A. Yu., Trunov A. I., Guryanova A. D. The method of adjusting the fuel equipment of a diesel locomotive by the characteristic of heat release under operating conditions [Metod regulirovki toplivnoy apparatury teplovoznogogo dizelya po kharakteristike teplovydeleniya v usloviyakh eksploatatsii] // VNIIZhT Scientific Journal. 2021. No. 80 (1). Pp. 20–29. ISSN 2223-9731.
- Brunt M., Rai H., Emtage A. The Calculation of Heat Release Energy from Engine Cylinder Pressure Data // SAE Technical Paper 981052, 1998.
- Stechkin B. S., Genkin K. I., Zolotarevskiy V. S. Indicator diagram, dynamics of heat generation and duty cycle of a high-speed piston engine [Indikatornaya diagramma, dinamika teplovydeleniya i rabochiy tsikl bystrokhodnogo porshnevogo dvigatelya]. Moscow : USSR Academy of Sciences, 1960. 199 p.
- Stefanovskiy B. S., Skobtsev E. A., Korsi E. K. Tests of internal combustion engines [Ispytaniya dvigateley vnutrennogo sgoraniya]. Moscow : Machinery, 1972. 368 p.
- Fedotov G. B., Levin G. I. Fuel systems of diesel locomotives. Repair, testing, improvement [Toplivnye sistemy teplovoznykh dizeley. Remont, ispytanie, sovershenstvovanie]. Moscow : Transport, 1983. 192 p.
- Diesel generator 1A-9DG modif. 3. Operation manual 1A.9DG.62R [Dizel'-generator 1A-9DG isp. 3. Rukovodstvo po ekspluatatsii 1A.9DG.62R].
- Vasin P. A. «Magistral» complex for diagnostics of a diesel locomotive [Dlya diagnostiki teplovozo — kompleks «Magistral»] // Locomotive. 2001. No. 7. Pp. 27–31. ISSN 0869-8147.
- Evaluation of a New Diagnostic Technique to Detect and Account for Load Variation during Cylinder Pressure Measurement of Large-Scale Four-Stroke Diesel Engines / D. Hountalas, A. Antonopoulos, G. Zovanos, R. Papagiannakis // SAE Technical Paper 2012-01-1342, 2012.

- Ios, G. Zovanos, R. Papagiannakis // SAE Technical Paper 2012-01-1342, 2012.
12. Коньков А.Ю., Лашко В.А. Диагностирование дизеля на основе идентификации рабочих процессов. Владивосток : Дальнавка, 2014. 356 с.
13. Лашко В.А., Коньков А.Ю. Расчетный метод коррекции действительного положения ВМТ при индицировании ДВС // Двигателестроение. 2007. № 3 (229). С. 34–38. ISSN 0202-1633.
14. Конькова И.Д., Давыдов Ю.А., Коньков А.Ю. Термодинамические методы коррекции абсолютного давления в цилиндре ДВС // Вестник Института тяги и подвижного состава. 2015. № 11. С. 45–49.
15. Горелик Г.Б. Процессы топливоподачи в дизелях: природа межциклической нестабильности, моделирование и расчет. Хабаровск : ТОГУ, 2015. 246 с.
16. Cylinder Pressure-Based Control in Heavy-Duty EGR Diesel Engines Using a Virtual Heat Release and Emission Sensor / F. Willems, E. Doosje, F. Engels, X. Seykens // SAE Technical Paper Series 2010-01-0564. 2010. DOI:10.4271/2010-01-0564.
17. Ritscher B. Dual-fuel engine with cylinder pressure based control // MTZ industrial. 2013. No. 3. Pp. 14–23. DOI:10.1007/s40353-013-0094-5.

12. Konkov A. Yu., Lashko V. A. Diesel diagnostics based on identification of work processes [Diagnostirovaniye dizelya na osnove identifikatsii rabochikh protsessov]. Vladivostok : Far Eastern Science, 2014. 356 p.
13. Lashko V. A., Konkov A. Yu. Calculated method for correcting the actual TDC position when indicating the internal combustion engine [Raschetnyy metod korreksii deystvitel'nogo polozheniya VMT pri inditsirovaniyu DVS] // Engines construction. 2007. No. 3 (229). Pp. 34–38. ISSN 0202-1633.
14. Konkova I. D., Davydov Yu. A., Konkov A. Yu. Thermodynamic methods for correcting the absolute pressure in the cylinder of an internal combustion engine [Termodinamicheskie metody korreksii absolyutnogo davleniya v tsilindre DVS] // Bulletin of the Institute of Traction and Rolling Stock. 2015. No. 11. Pp. 45–49.
15. Gorelik G. B. Fuel supply processes in diesel engines: nature of inter-cycle instability, modeling and calculation [Protsessy toplivopodachi v dizelyakh: priroda mezhtsiklovoy nestabil'nosti, modelirovaniye i raschet]. Khabarovsk : PNU, 2015. 246 p.
16. Cylinder Pressure-Based Control in Heavy-Duty EGR Diesel Engines Using a Virtual Heat Release and Emission Sensor / F. Willems, E. Doosje, F. Engels, X. Seykens // SAE Technical Paper Series 2010-01-0564. 2010. DOI:10.4271/2010-01-0564.
17. Ritscher B. Dual-fuel engine with cylinder pressure based control // MTZ industrial. 2013. No. 3. Pp. 14–23. DOI:10.1007/s40353-013-0094-5.

Объем статьи 0,97 авторских листа

УДК 629.421.1

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

Дмитрий Леонидович Худояров, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Игорь Андреевич Тюшев, аспирант кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДИАГНОСТИКИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ 2ЭС6 «СИНАРА»

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

Dmitriy Leonidovich Khudojarov, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Igor Andreevich Tyushev, postgraduate student, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

## Development of diagnostics algorithm for electric traction motors of 2ES6 «Sinara» electric locomotives

### Аннотация

По результатам анализа основных причин, приводящих к отказам и неплановым ремонтам тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 «Синара», разработан алгоритм предиктивной диагностики для выявления электрических повреждений компенсационных, якорных обмоток и обмоток возбуждения. Установлено, что при проверке работоспособности и поиске электрических повреждений обмоток разнотипных тяговых двигателей, используемых на локомотивах, следует обращать внимание на отклонения по току якоря между смежными тележками.

**Ключевые слова:** электровоз, тяговый двигатель, работоспособность, диагностика, критерий, анализ, неплановый ремонт, проверка, алгоритм.

### Summary

According to results of analysis of main reasons that lead to failures and unscheduled repairs of electric traction motors of 2ES6 «Sinara» electric locomotives the authors have developed an algorithm of predictive diagnostics for detecting electric damage of stabilizing, armature and exciting windings. They have also established that at functional test and search of electric damage of windings of various traction motors used on locomotives it is necessary to pay attention to armature current deviations between neighbour bogies.

**Keywords:** electric locomotive, traction motor, efficiency, diagnostics, criterion, analysis, unscheduled repair, inspection, algorithm.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-74-79

**П**роблема отказов и, как следствие, неплановых ремонтов тяговых электродвигателей (ТЭД) электровозов 2ЭС6 до сих пор остается в зоне повышенного внимания [1, 2]. Предупредить отказы и неплановые ремонты помогают статистические данные, получаемые с бортовых систем диагностики электровозов 2ЭС6, однако, как показывает практика, не вся диагностическая информация используется в определении первостепенных причин возникновения отказов. Поэтому целью исследования, представленного в данной статье, стала разработка алгоритма предиктивной диагностики обмоток тяговых электродвигателей 2ЭС6 для выявления электрических повреждений.

Необходимо отметить, что предиктивной диагностикой отдельных узлов и деталей локомотивов занимается целый ряд научных коллективов (ООО «НПО САУТ», АО «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», ПКБ ЦТ ОАО «РЖД», УрГУПС) [3–6]. Исходя из актуальности проблемы в нашем исследовании ставится задача разработать условия предиктивной диагностики обмоток тяговых электродвигателей по диагностическим критериям на основе статистической информации, полученной с бортовых систем диагностики электровозов 2ЭС6 [7]. Новизна исследования состоит в том, что использование разработанного алгоритма предиктивной диагностики обмоток позволит существенно улучшить техническое состояние тяговых электродвигателей локомотивного парка 2ЭС6.

Статистика большого количества неплановых ремонтов по причине отказов тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 на протяжении 2019 и 2020 гг. только подтверждает высокую актуальность исследования (рис. 1).

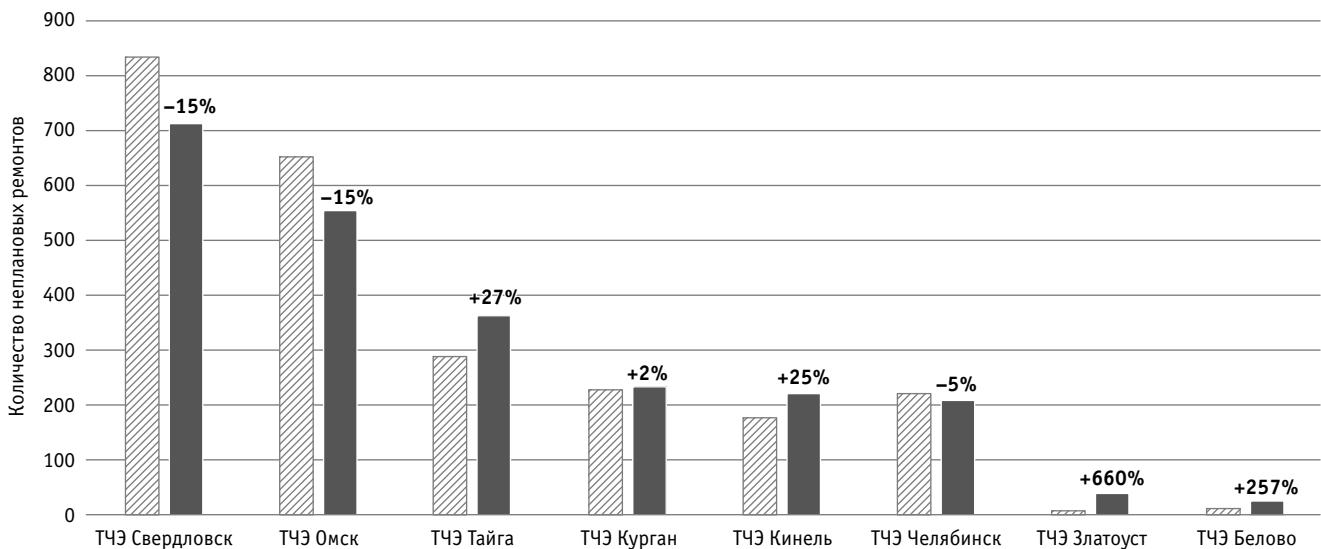


Рис. 1. Статистические данные о неплановых ремонтах тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 по депо приписки за 2019 и 2020 гг.:

◻ — количество неплановых ремонтов за 2019 г.; ■ — количество неплановых ремонтов за 2020 г.

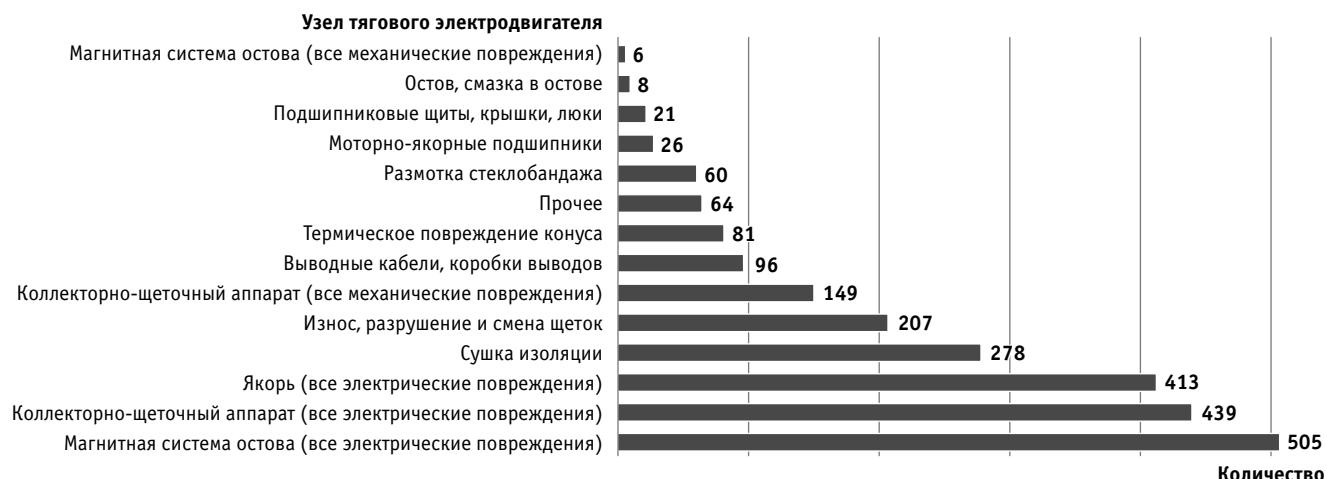


Рис. 2. Распределение причин неплановых ремонтов тяговых электродвигателей локомотивов 2ЭС6 за 2020 г.

Как показывают статистические данные Центра мониторинга технического состояния локомотивов новых серий ООО «СТМ–Сервис», дислоцированного на территории сервисного локомотивного депо Свердловск (см. рис. 1), только за 12 месяцев 2020 г. зафиксировано неплановых видов ремонта на 2353 секциях, из них на 2264 секциях — по тяговым электродвигателям. Наибольшее количество неплановых ремонтов приходилось на локомотивы приписки к эксплуатационному локомотивному депо (ТЧЭ) Свердловск (30 % от общего количества) и ТЧЭ Омск (24 %). Сравнение количества неплановых ремонтов в 2019 и 2020 гг. показывает небольшое отличие в абсолютных величинах. Однако если принимать во внимание увеличение численности локомотивного парка 2ЭС6 и пробегов локомотива, то при расчете удельных показателей отмечается снижение количества неплановых ремонтов в 2020 г. на 18 %.

Большое количество неплановых ремонтов становится причиной ухудшения технического состояния самих тяговых электродвигателей и напрямую влияет на коэффициент готовности к эксплуатации локомотивного парка 2ЭС6.

Углубленный анализ неплановых ремонтов тяговых электродвигателей 2ЭС6 показал, что основные причины, которые приводят к возникновению неисправностей и соответственно к постановке электровоза на неплановый ремонт, можно сформировать в последовательность, показанную на рис. 2.

В соответствии с распределением основных причин неплановых ремонтов (см. рис. 2) на первом месте находятся неисправности, связанные с магнитной системой остова тяговых электродвигателей, т.е. все электрические повреждения по якорным, компенсационным и обмоткам возбуждения: обрывы, прогары, пробои, короткие замыкания, пониженное сопротивление изоляции. Пик роста этих неисправностей приходится

на неблагоприятные климатические условия и зимнее время года, что обусловлено конструкционными недостатками защиты от попадания осадков в корпус тяговых электродвигателей локомотивов 2ЭС6.

На электровозе 2ЭС6 используется четыре типа ТЭД: СТК-810, ЭДП810, ЭК-810Ч, ДПТ810-2 [8]. Статистика распределения причин неплановых ремонтов по каждому типу ТЭД локомотивов 2ЭС6 представлена на рис. 3.

Как видно из рис. 3, неисправности магнитной системы остова, связанные с электрическими повреждениями, по ЭК-810Ч составляют 10% от общей статистики за 2020 г., а только по типу ЭК-810Ч — 26%. Последнее объясняется тем, что ЭК-810Ч — самый распространенный тип тягового электродвигателя локомотивного парка 2ЭС6 (57,3% на 2264 секциях).

Анализ группы локомотивов с электрическими повреждениями магнитной системы остова и якоря (короткое замыкание, обрыв, пробой обмоток ТЭД) позволил выявить такую отличительную особенность: в тяговом электродвигателе наблюдаются отклонения токов якорей и токов возбуждения в смежных тележках электровоза с разнотипными парами двигателей.

Для более точного анализа было сформировано две группы локомотивов с разнотипными тяговыми двигателями: первая группа — локомотивы со всеми электрическими повреждениями по якорным и компенсационным обмоткам (рис. 4) и обмот-

кам возбуждения (рис. 5); вторая группа — локомотивы без замечаний, т.е. заведомо исправные по якорным и компенсационным обмоткам (рис. 6) и обмоткам возбуждения (рис. 7).

Анализ первой группы локомотивов с замечаниями по якорным и компенсационным обмоткам (см. рис. 4) позволил определить три закономерности:

до момента отказа тягового электродвигателя разница отклонений токов якорей между смежными тележками составляла более  $\pm 150$  А (показатель получен по оценке среднего значения отклонений токов). В моменты отказов ТЭД наблюдалась существенная разница отклонений токов якорей между смежными тележками, достигавшая значений  $\pm 1000$  А и выше, что из-за резкого снижения сопротивления изоляции обмоток приводило к отключению аппаратов защиты;

большая доля отклонений и срабатываний аппаратов защиты зафиксирована на 45-й позиции серий-параллельного соединения и 65-й позиции параллельного соединения, а меньшая доля — на остальных позициях;

угловой коэффициент  $k$  при построении линейного тренда (линейная функция  $y = kx + b$ ) [9, 10] в большинстве случаев либо был равен  $\pm 0,1$ , либо  $k \rightarrow 0$ . То есть максимум линейного тренда

$$kx + b|_{k=\pm 0,1} = \pm 0,1x + b, \quad (1)$$

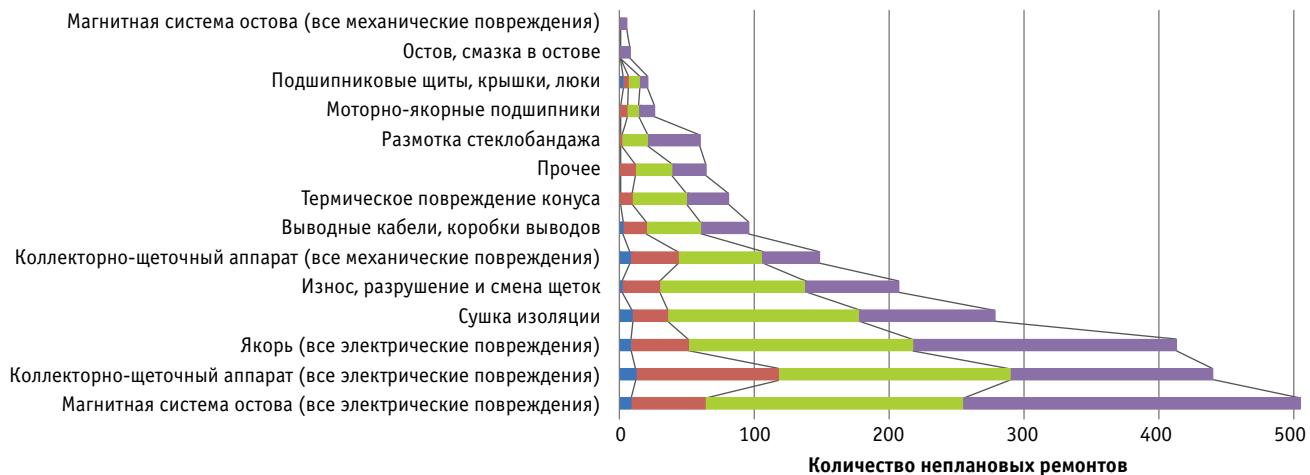


Рис. 3. Распределение причин неплановых ремонтов по типу тяговых электродвигателей за 2020 г.:  
■ — ДПТ810-2; ■ — СТК-810; ■ — ЭДП810; ■ — ЭК-810Ч

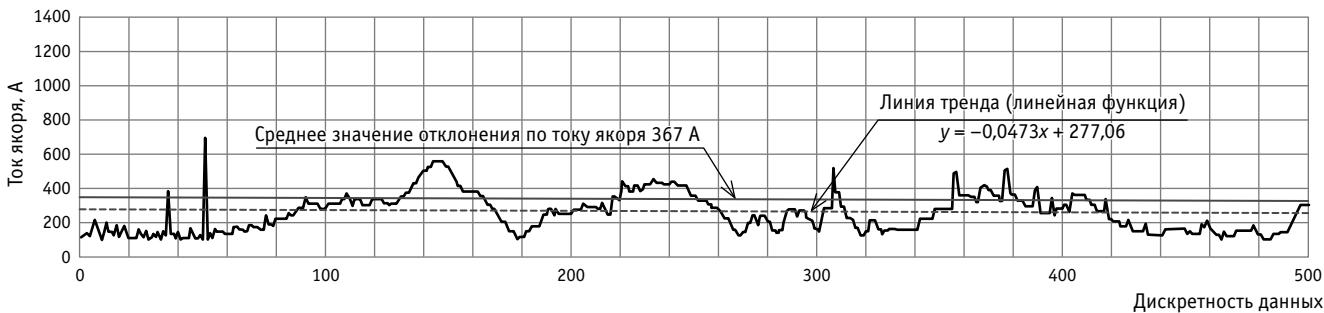


Рис. 4. Осциллограмма отклонений по току якоря электровоза 2ЭС6 № 17 из группы локомотивов с замечаниями по якорной и компенсационной обмотке



Рис. 5. Осциллограмма отклонений по току возбуждения электровоза 2ЭС6 № 496 из группы локомотивов с замечаниями по обмоткам возбуждения

где  $k$  — угловой коэффициент, отвечающий за наклон линейного тренда, т.е. за увеличение или снижение характеристики отклонений;

$b$  — свободный коэффициент, обусловливающий сдвиг вдоль оси  $OY$ , т.е. амплитуду отклонений, практически равен значению среднего отклонения; соответственно минимум линейного тренда равен

$$\lim_{k \rightarrow 0} kx + b; \\ \lim_{k \rightarrow 0} kx + b = b. \quad (2)$$

На локомотивах второй группы, т.е. без электрических повреждений, угловой коэффициент  $k \in (0,1; +\infty)$  и  $(-0,1; -\infty)$ , следовательно, в этом случае минимум будет равен максимуму линейного тренда в группе локомотивов с электрическими повреждениями по обмоткам двигателя.

При анализе отклонений по токам возбуждения (см. рис. 5) существенных отклонений и закономерностей не выявлено. Отклонения по току возбуждения практически прямо пропорциональны изменению по токам якорей. Средние значения отклонений были существенно малы и составляли не более  $\pm 70$  А. Дискретность данных учитывалась исходя из рассматриваемых интервалов до моментов отказов тяговых электродвигателей. Ось дискретности данных указывала на количество отклонений с интервалом в 0,05 с.

Анализ второй группы локомотивов показал (см. рис. 6 и 7) наличие между смежными тележками отклонений по току якоря и току возбуждения, которые

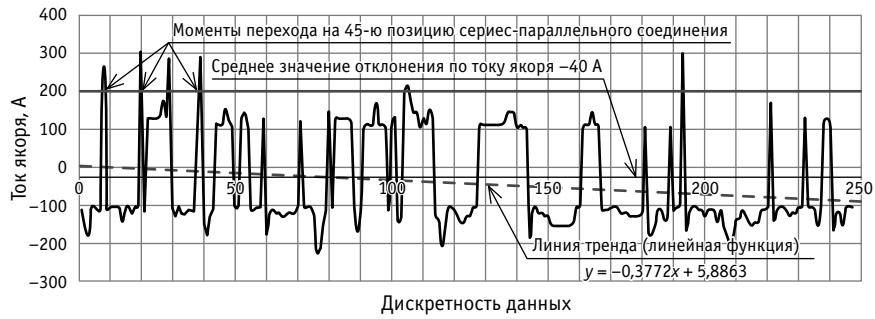


Рис. 6. Осциллограмма отклонений по току якоря электровоза 2ЭС6 № 348 из группы локомотивов без замечаний по якорным и компенсационным обмоткам



Рис. 7. Осциллограмма отклонений по току возбуждения электровоза 2ЭС6 № 348 из группы локомотивов без замечаний по обмоткам возбуждения

в среднем не превышали  $\pm 150$  А и  $\pm 70$  А соответственно. Установлено, что при переходе на 45-ю позицию серийс-параллельного соединения как с высшей, так и с низшей позиции происходили кратковременные броски по току якоря  $\pm 200$  А [11].

Аналогично в случаях отклонений по току якоря угловой коэффициент  $k$  находился, как правило, в промежутках  $k \in (0,1; +\infty)$  и  $(-0,1; -\infty)$ , по току возбуждения принадлежность углового ко-

эффициента  $k$  к определенным промежуткам установить не удалось.

Исходя из выявленных отклонений по току якоря можно составить обобщенную таблицу по группам рассмотренных локомотивов, чтобы определить средневзвешенные показатели, которые, в свою очередь, позволяют найти конкретное значение одного из условий для поиска электрических повреждений обмоток тяговых электродвигателей (табл. 1).

Таблица 1

Статистика средневзвешенных отклонений по току якоря в рассматриваемых группах локомотивов

Показатель	Соединение			
	Сериес-параллельное	Сериес-параллельное	Параллельное	Сериесное, серийно-параллельное, параллельное
	44-я позиция	45-я позиция	65-я позиция	Остальные позиции
Первая группа локомотивов со всеми электрическими повреждениями по обмоткам тягового электродвигателя				
Среднее значение отклонения по току якоря, %	8	49	26	17
Среднее значение отклонений по току якоря, А	259	181	149	160
Вторая группа локомотивов без замечаний по обмоткам тяговых электродвигателей				
Среднее значение отклонений по току якоря, %	11	42	29	18
Среднее значение отклонений по току якоря, А	140	146	119	160

Из табл. 1 следует, что по среднему значению отклонений по току якоря 181 А и выше на 44-й позиции серийно-параллельного соединения можно судить о наличии таких отклонений и об электрических повреждениях в обмотке якоря двигателя, а при среднем значении отклонений по току якоря 140 А и ниже на 44-й позиции серийно-параллельного соединения — об отсутствии электрических повреждений.

На основе разработанного алгоритма в уже существующей системе бортовой диагностики электровозов 2ЭС6 был составлен алгоритм предиктивной диагностики обмоток тяговых электродвигателей для выявления электрических повреждений (рис. 8).

Представленный на рис. 8 алгоритм включает в себя шесть функциональных блоков. Блок 1 предназначен определять на-

личие разнотипных пар тяговых электродвигателей в смежных тележках по данным систем электронных паспортов локомотивов. Функция блока 2 заключается в поиске диагностических критериев при выполнении условий, указанных в блоке 3. Если все эти условия выполняются, значит, в тяговом электродвигателе присутствуют электрические повреждения обмоток. Блок 4 определяет, находится ли локомотив в эксплуатируемом парке или нет. Блок 5 определяет конкретные действия по отключению тяговых электродвигателей из цепи для своевременного предупреждения отказа, если локомотив находится в эксплуатируемом парке. Блок 6 предполагает комиссионный осмотр тягового электродвигателя для определения и подтверждения электрических повреждений, если локомотив находится в неэксплуатируемом парке.

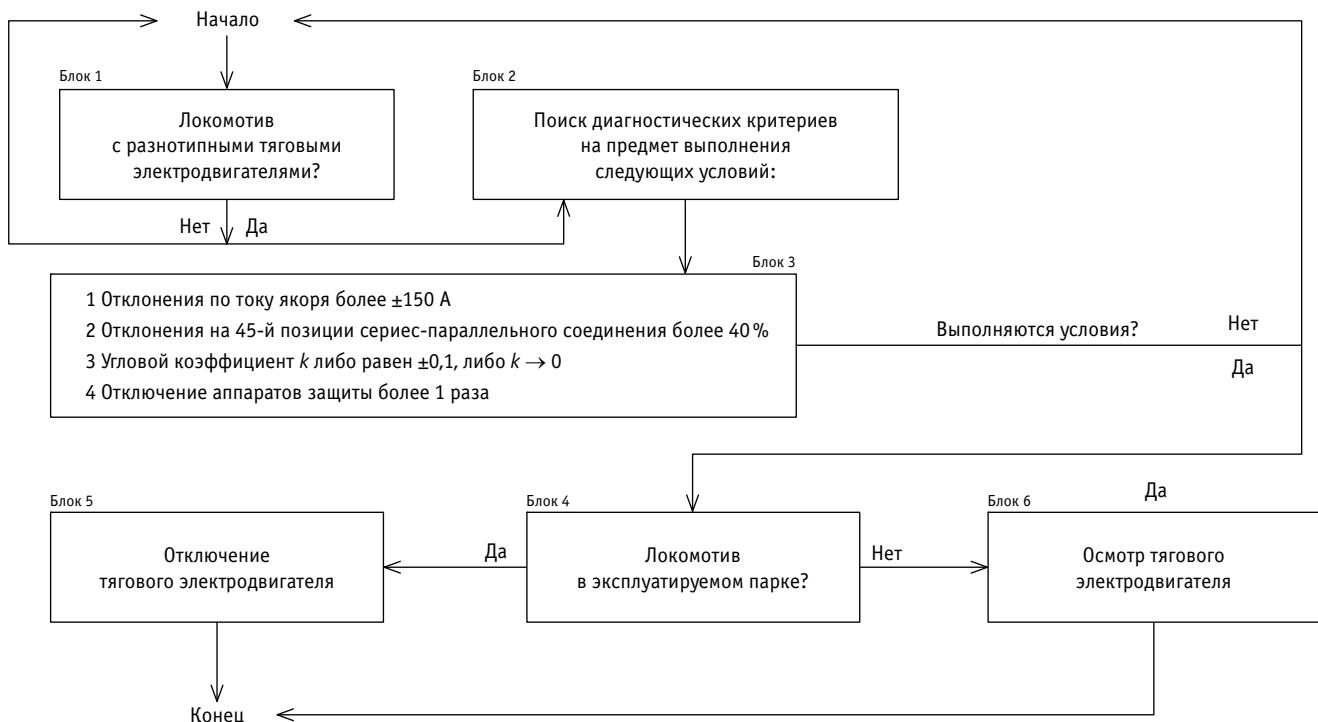


Рис. 8. Алгоритм предиктивной диагностики обмоток тяговых электродвигателей для выявления электрических повреждений

Реализация предложенного алгоритма возможна в составе программного обеспечения существующей системы бортовой диагностики электровозов 2ЭС6 без дополнительной установки измерительного оборудования, а также в составе специализированного программного и серверного оборудования центров мониторинга технического состояния локомотивов новых серий ООО «СТМ-Сервис», осуществляющих непрерывный мониторинг технического состояния отдельных узлов и компонентов электровозов с использованием системы СВЛ ТР и выполняющих сбор и анализ диагностических данных [3, 5].

Таким образом, исходя из результатов проведенного исследования можно сделать следующие выводы. Предиктивная

диагностика обмоток тяговых электродвигателей локомотивов по выявлению электрических повреждений, таких как прогар, пробой, короткое замыкание, осуществима при выполнении всех условий блока 3 (см. рис. 8). Разработанный алгоритм, направленный на совершенствование системы предиктивной диагностики, создает возможности для предупреждения отказов обмоток тяговых электродвигателей, а значит, для увеличения коэффициента готовности локомотивного парка к эксплуатации. Перспективы дальнейших исследований состоят в разработке пакета программного обеспечения для реализации предложенного алгоритма с учетом диагностических критериев в системе бортовой диагностики электровозов 2ЭС6.

## Литература

1. Яковлев К. Н., Саланов А. Е. Анализ случаев неплановых видов ремонта электровозам серии 2ЭС6 в Свердловской дирекции тяги // Синтез науки и образования как механизм перехода к постиндустриальному обществу : сборник статей Международной научно-практической конференции. Уфа, 2021. С. 50–55.
2. Буйносов А. П., Худояров Д. Л., Тюшев И. А. Развитие функциональных возможностей системы диагностики локомотивов // Железнодорожный транспорт. 2021. № 2. С. 60–63. ISSN 0044–4448.
3. Лакин И. И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2016.
4. Аболмасов А. А., Лисин Д. О., Мельников В. А. Совершенствование методов диагностирования электрических машин локомотивов по данным микропроцессорных систем управления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. Т. 63. № 3. С. 69–75. ISSN 1813–9108.
5. Буйносов А. П., Наговицын В. С., Марулин С. Л. Методология развития систем мониторинга, диагностирования, обслуживания и ремонта подвижного состава // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 11. С. 110–113. ISSN 2079–5920.
6. Буйносов А. П., Лаптев С. И. Способ оценки достоверности результатов при проведении технической диагностики локомотивов // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 1. С. 43–46. ISSN 2079–5920.
7. Худояров Д. Л., Тюшев И. А. Развитие систем бортовой диагностики локомотивов // Инновационный транспорт. 2018. № 4 (30). С. 43–48. DOI: 10.20291/2311-164X-2018-4-43-48. ISSN 2311–164X.
8. Брексон В. В. Электровоз 2ЭС6 «Синара». Верхняя Пышма : «Уральские локомотивы», 2015. 328 с.
9. Афанасьев В. Н., Юзбашев М. М. Анализ временных рядов и прогнозирование : учебник. Москва : Финансы и статистика, 2001. 228 с.
10. Буйносов А. П., Худояров Д. Л., Тюшев И. А. Алгоритмизация процесса расшифровки диагностической информации современных локомотивов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2020. № 4 (53). С. 9–11. ISSN 1818–5509.
11. Наговицын В. С., Буйносов А. П. Структурная классификация технических средств диагностики тягового подвижного состава // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 326–329. ISSN 2079–5920.

## References

1. Yakovlev K. N., Salanov A. E. Analysis of cases of unscheduled repairs of 2ES6 electric locomotives in the Sverdlovsk Traction Directorate [Analiz sluchaei neplanovykh vidov remonta elektrovozam serii 2ES6 v Sverdlovskoy direktsii tyagi] // Synthesis of science and education as mechanism of transition to post industrial society : collection of papers of the International research and practice conference. Ufa, 2021. Pp. 50–55.
2. Buynosov A. P., Khudoyarov D. L., Tyshev I. A. Development of functional possibilities of locomotives diagnostics system [Razvitiye funktsional'nykh vozmozhnostey sistemy diagnostiki lokomotivov] // Railway Transport. 2021. No. 2. Pp. 60–63. ISSN 0044–4448.
3. Lakin I. I. Monitoring of technical condition of locomotives according to data of onboard hardware and software complexes [Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov po dannym bortovykh apparatno-programmnykh kompleksov] : PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2016.
4. Abolmasov A. A., Lisin D. O., Melnikov V. A. Improving the methods of diagnosing electric machines of locomotives according to the data of microprocessor control systems [Sovershenstvovanie metodov diagnostirovaniya elektricheskikh mashin lokomotivov po dannym mikroprotsessornykh sistem upravleniya] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2019. Vol. 63. No. 3. Pp. 69–75. ISSN 1813-9108.
5. Buinosov A. P., Nagovitsyn V. S., Marulin S. L. The methodology for the development of systems for monitoring, diagnosis, maintenance and repair of rolling stock [Metodologiya razvitiya sistem monitoringa, diagnostirovaniya, obsluzhivaniya i remonta podvizhnogo sostava] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2018. No. 11. Pp. 110–113. ISSN 2079–5920.
6. Buinosov A. P., Laptev S. I. Method of estimation of reliability of results at carrying out technical diagnostics of locomotives [Sposob otsenki dostovernosti rezul'tatov pri provedenii tekhnicheskoy diagnostiki lokomotivov] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2019. No. 1. Pp. 43–46. ISSN 2079-5920.
7. Khudoyarov D. L., Tyshev I. A. Development of locomotive on-board diagnostics systems [Razvitiye sistem bortovoy diagnostiki lokomotivov] // Innotrans. 2018. No. 4 (30). Pp. 43–48. DOI: 10.20291/2311-164X-2018-4-43-48. ISSN 2311-164X.
8. Brekson V. V. Electric locomotive 2ES6 «Sinara» [Elektrovoz 2ES6 «Sinara】. Verkhnyaya Pyshma : Ural Locomotives, 2015. 328 p.
9. Afanasyev V. N., Yuzbashov M. M. Analysis of time series and forecasting [Analiz vremennyykh ryadov i prognozirovaniye] : textbook. Moscow : Finance and Statistics, 2001. 228 p.
10. Buynosov A. P., Khudoyarov D. L., Tyshev I. A. Algorithmization of interpretation process of diagnostic information from modern locomotives [Algoritmizatsiya protsessa rasshifrovki diagnosticheskoy informatsii sovremennykh lokomotivov] // Works of RGUPS. 2020. No. 4 (53). Pp. 9–11. ISSN 1818-5509.
11. Buynosov A. P., Nagovitsyn V. S. Structural classification of means of diagnostics of the traction rolling stock [Strukturnaya klassifikatsiya tekhnicheskikh sredstv diagnostiki tyagovogo podvizhnogo sostava] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2012. No. 6. Pp. 326–329. ISSN 2079–5920.

УДК 625.122

Юрий Сергеевич Меркуров, ведущий инженер-проектировщик отдела пути и сооружений  
АО «ЛенГипрострой», Санкт-Петербург, Россия

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЕМПФИРОВАНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ В СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ РАЙОНАХ

*Yuriy Sergeevich Merkuryev, Leading Design Engineer, Communication Lines and Constructions Department, JSC «Leningradskaya General Engineering Design-Building Organization», St. Petersburg, Russia*

### Determination of optimal parameters of railway roadbed damping in seismically active regions

#### Аннотация

В статье рассмотрена разработка конструкций демпфирующего слоя земляного полотна с параметрами, обеспечивающими безопасность железнодорожных перевозок в сейсмически активных районах. Представлены теоретические исследования сейсмических воздействий на земляное полотно железных дорог на основе анализа параметров воздействия землетрясения на напряженно-деформированное состояние конструкции железнодорожного пути. Использованы методы многофакторного планирования эксперимента. Разработана методика определения оптимальных параметров демпфирования в зависимости от основных параметров землетрясения (мagnитуды, расстояния от гипоцентра, физико-механических характеристик земной коры) и геологических характеристик участка дороги (мощности слоев, деформационных и упругих свойств земной коры, оснований и земляного полотна). Предложены конструкции демпфирующего слоя, имеющего слоисто-неоднородную композиционную структуру с заданными свойствами. Установлена возможность повышения сейсмической устойчивости земляного полотна железных дорог за счет устройства демпфирующего слоя с заданными свойствами.

**Ключевые слова:** земляное полотно, сейсмические воздействия, деформационные параметры, слоисто-неоднородная композиционная структура, демпфирующий слой.

#### Summary

The paper considers a damping layer design for roadbed with parameters that provide safety of railway traffic in seismically dangerous regions. It presents a theoretical study of seismic forces on railway roadbed on the basis of analysis of earthquake influence parameters on stressed and strained state of railway track construction. For the investigations the author has applied methods of multifactorial experimental design. The author has developed a method for determination of optimal parameters for damping depending on main parameters of an earthquake (magnitude, distance from hypocenter, physical and mechanical characteristics of the Earth crust) and geological characteristics of a railway section (capability of layers, deformational and elastic properties of the Earth crust, foundation and roadbed). As a result, the author suggests designs of a damping layer that has a layered-geterogenous compositional structure with given properties. Moreover, he has established a possibility to increase an aseismic stability of railway roadbed by construction of the damping layer with given properties.

**Keywords:** roadbed, seismic forces, deformational parameters, layered-geterogenous compositional structure, damping layer.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-80-83

Одна из основных задач, определенных «Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» [1], — массовое строительство новых и реконструкция действующих железных дорог для существенного увеличения объемов грузовых и пассажирских перевозок.

Железные дороги России характеризуются значительной протяженностью и пересекают территории со сложными инженерно-геологическими условиями, в том числе сейсмически опасные районы. Поэтому повышение качества строительства и реконструкции дорог в таких районах — важнейшая задача обеспечения безопасности перевозок.

В настоящей статье рассматривается задача повышения сейсмической устойчивости земляного полотна железных дорог за счет устройства в основании насыпи демпфирующего слоя, представляющего собой слоисто-неоднородную композиционную структуру с заданными свойствами.

В работах [2, 3] автором выполнен анализ воздействия параметров землетрясения на напряженно-деформированное состояние элементов конструкции железнодорожного пути. В основу анализа положена взаимосвязь между сжимающими напряжениями, возникающими в насыпи, основании, земной коре, и физико-механическими характеристиками рассматриваемой конструкции, такими как мощность слоя, показатель деформируемости и модуль упругости. Изначально рассматриваемая зависимость получена В. Н. Тюпиным [4, 5] в результате решения уравнения, составленного с помощью закона сохранения энергии. Графики зависимостей сжимающих напряжений в конструкции железнодорожного пути от физико-механических характеристик представлены на рис. 1.

Оптимальным сочетанием является максимальный показатель деформируемости и минимальный модуль упругости каждого из слоев модели конструкции железнодорожного пути. Оба оптимизируемых параметра вне сейсмического воздействия должны обеспечивать надежность

сооружения, исключать возможность образования дефектов, требующих ограничения скорости и веса подвижного состава. Классификация повреждений земляного полотна приводится в разделе 6 СП 270.1325800.2016 [6].

В работе [3] предложена расчетная схема с демпфирующим слоем (рис. 2), который представляет собой элемент конструкции железнодорожного пути на границе поверхностей основания и земляного полотна. Также выполнен анализ влияния параметров демпфирующего слоя на напряженно-деформируемое состояние земляного полотна и выявлены перспективные пути повышения сейсмостойкости конструкции железнодорожного пути.

В соответствии с представленной выше схемой сжимающие напряжения определяются по формуле

$$\sigma(r) = \sqrt{\frac{\frac{W_3}{\pi r^2} + 4\bar{\rho}gh^2}{\frac{\Phi_K r}{3E_K} + \frac{\Phi_{осн}h_{осн}}{E_{осн}} + k_{зп}\frac{\Phi_{зп}h_{зп}}{E_{зп}} + k_{dc}\frac{\Phi_{dc}h_{dc}}{E_{dc}}}}, \quad (1)$$

где  $r$  — расстояние от гипоцентра, м;

$\bar{\rho}$  — средняя объемная масса железнодорожного пути, 1800 кг/м<sup>3</sup>;

$g$  — ускорение свободного падения, 9,8 м/с<sup>2</sup>;

$h$  — высота верхнего строения пути, 3 м;

$\Phi_K$ ,  $\Phi_{осн}$ ,  $\Phi_{зп}$  и  $\Phi_{dc}$  — показатели деформируемости земной коры, основания, земляного полотна и демпфирующего слоя соответственно;

$h_{осн}$ ,  $h_{зп}$  и  $h_{dc}$  — мощности основания, земляного полотна и демпфирующего слоя, м;

$E_K$ ,  $E_{осн}$ ,  $E_{зп}$  и  $E_{dc}$  — модули упругости земной коры, основания, земляного полотна и демпфирующего слоя, МПа;

$k_{зп}$  и  $k_{dc}$  — коэффициенты относительных затрат энергии на трение в земляном полотне и демпфирующим слое;

$W_3 = 2,09 \cdot 10^{15}$  Дж — энергия землетрясения (для интенсивности  $I_0 = 9$  баллов),

$$W_3 = 10^{5,24+1,44M}, \quad (2)$$

где  $M$  — магнитуда землетрясения.

Для расчета принимаются характеристики, приведенные в табл. 1.

К основным параметрам демпфирования согласно формуле (1) относятся мощности слоев, показатели деформируемости  $\Phi$  и модули упругости  $E$ .

В данной работе оптимальные параметры определяются для землетрясения интенсивностью 9 баллов, что соответствует магнитуде 7 [3].

Анализ формулы (1) позволяет сделать вывод, что оптимальным сочетанием является максимальный показатель деформируемости и минимальный модуль упругости каждого из слоев модели конструкции железнодорожного пути (см. рис. 1).

На определенном участке трассы с фиксированными параметрами землетрясения (магнитуда, расстояние от гипоцентра, физико-механические характеристики земной коры), ха-

рактеристиками основания и земляного полотна оценке будут подлежать параметры демпфирующего слоя  $\Phi_{dc}$ ,  $E_{dc}$  и  $h_{dc}$ .

Для расчетов принят средний по сейсмическим свойствам грунт (п. 3.19 СП 270.1325800.2016 [6]) — песчано-глинистые отложения. Модуль упругости (модуль деформации) в соответствии с приложением А СП 22.13330.2016 [7] имеет значение  $E_{dc} = 20$  МПа.

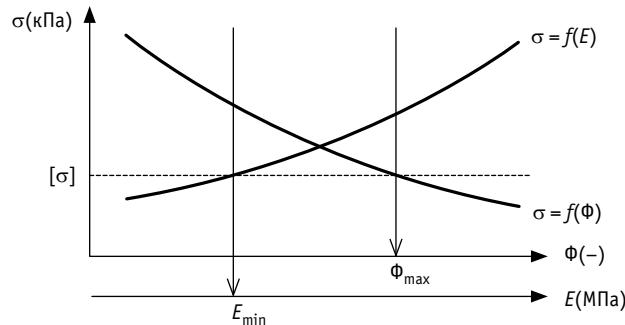


Рис. 1. Зависимости сжимающих напряжений  $\sigma$  от показателя деформируемости  $\Phi$  и модуля упругости  $E$

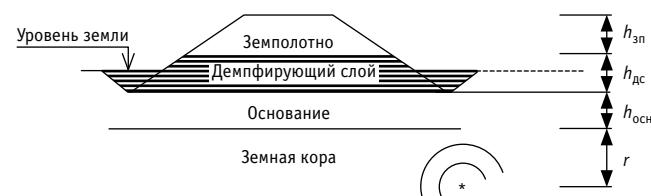


Рис. 2. Расчетная схема системы «гипоцентр — железнодорожный путь» с демпфирующим слоем

Таблица 1

Расчетные характеристики участка насыпи

Характеристика	Значение
Расстояние от гипоцентра $R$ , км	10
Высота основания $h_{осн}$ , м	50
Высота земляного полотна $h_{зп}$ , м	6
Магнитуда $M$	7
Энергия землетрясения (для $M = 7$ ) $W_3$ , Дж	$2,09 \cdot 10^{15}$
Средняя объемная масса железнодорожного пути $\bar{\rho}$ , кг/м <sup>3</sup>	1800
Высота пути $h$ , м	3
Показатель деформируемости земной коры $\Phi_K$	5
Модуль упругости земной коры $E_K$ , МПа	$10 \cdot 10^4$
Показатель деформируемости основания $\Phi_{осн}$	50
Модуль упругости основания $E_{осн}$ , МПа	30
Показатель деформируемости земляного полотна $\Phi_{зп}$	300
Модуль упругости земляного полотна $E_{зп}$ , МПа	20

На основе зависимости (3), приведенной в монографии В. Н. Тюпина [5], следует, что показатель деформируемости сыпучего материала можно изменять за счет объема пустот:

$$\Phi_c = 2000 \frac{K_p - 1}{K_p}, \quad (3)$$

где  $K_p$  — коэффициент разрыхления.

В монографии [5] приведены показатели деформируемости различных сыпучих материалов. На рис. 3 представлен график зависимости показателя деформируемости сыпучего материала от коэффициента разрыхления  $\Phi_c = f(K_p)$ .

Согласно рис. 4, для допускаемого значения напряжения 100 кПа показатель деформируемости  $\Phi_c$  должен быть равен 11400.

При используемых в расчете параметрах (см. табл. 1) для снижения сжимающего напряжения в земляном полотне ниже допустимого уровня в 0,1 МПа показатель деформируемости демпфирующего слоя должен принимать значение  $\Phi_{dc} = 11400$ . Для расчета принимается наибольшее из представленных в [5] значений, а именно  $\Phi_{dc} = 750$ .

Исходя из анализа воздействия упругих волн [8] наиболее оптимальными следует считать конструкции со слоисто-неоднородной структурой. Также для достижения дополнительного эффекта демпфирования необходимо сооружать вдоль земляного полотна конструкции, которые будут нейтрализовывать кинетическую энергию землетрясения. Например, такими элементами являются канавы, укрепление их дна щебнем или другим крупнообломочным материалом.

Конструкция демпфера должна состоять из чередующихся слоев, заполненных дискретным материалом (щебнем, песком) и связанным (пластичным) материалом — глинистым грунтом. Такая конструкция обеспечивает нейтрализацию сейсмических волн. Подбор требуемых параметров демпфирования осуществляется за счет используемого материала демпфера и толщины дискретных и пластичных слоев.

Автор предлагает выполнять демпфирующий слой из ряда чередующихся элементов:

пространственной георешетки, заполненной смесью щебня и пылеватого песка с коэффициентом пористости  $e > 0,75$  (принятый модуль упругости  $E = 20$  МПа);

обоймы из глинистых грунтов (принятый модуль деформации  $E = 10$  МПа).

При проектировании демпфера грунтовые материалы, георешетки, толщину слоев выбирают в зависимости от параметров землетрясений, определяемых из работ по микросейсмогеодинамики [9]. Следует использовать корректные характеристики модуля упругости  $E$ . Актуальность данной проблемы подробно изучена в работах Е. В. Федоренко, в том числе в нормативных документах [10], разработанных с его участием.

Расположение слоев глинистых грунтов необходимо предусматривать ниже глубины промерзания грунта во избежание морозного пучения в соответствующих климатических условиях. Определение оптимальных параметров демпфирования конструкции земляного полотна при всех вышеописанных

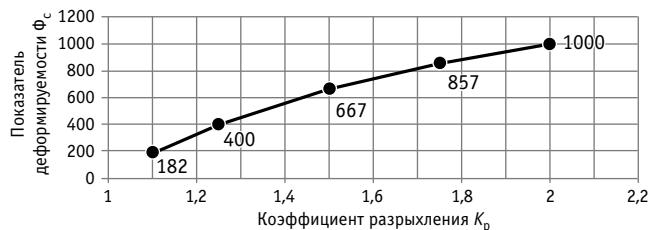


Рис. 3. Зависимость показателя деформируемости сыпучего материала от коэффициента разрыхления  $\Phi_c = f(K_p)$

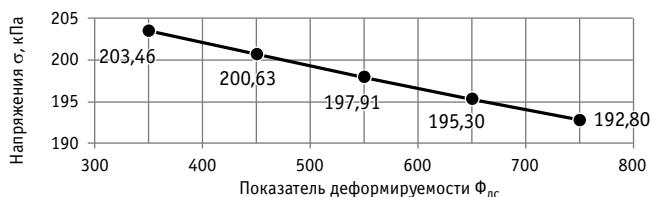


Рис. 4. Зависимость  $\sigma = f(\Phi_{dc})$  сжимающих напряжений в конструкции железнодорожного пути от показателя деформируемости демпфирующего слоя мощностью 1 м при характеристиках систем, приведенных в табл. 1



Рис. 5. Зависимость сжимающих напряжений в конструкции железнодорожного пути от мощности демпфирующего слоя  $\sigma = f(h_{dc})$



Рис. 6. Результаты расчета параметров демпфирования конструкции железнодорожного пути

ограничениях физико-механических характеристик заключается в расчете мощности демпфирующего слоя.

По рис. 5 определяется требуемая мощность демпфирующего слоя.

При принятых характеристиках конструкции мощность слоя должна составлять примерно 4,2 м. Схема конструкции железнодорожного пути с рассчитанными характеристиками представлена на рис. 6.

Разработанная методика определения параметров демпфирующего слоя и алгоритм расчета рекомендуются для проектирования насыпей железных дорог в сейсмоопасных районах.

## Литература

- Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.06.2008 г. № 877-р. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/1/1010> (дата обращения: 02.06.2021).
- Алпысова В. А., Меркульев Ю. С. Влияние параметров землетрясений на конструкцию земляного полотна // Современные методы проектирования магистральных железных дорог как элементов природно-технической системы : материалы научно-практической конференции. Новосибирск, 21–22 ноября 2013 г. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2015. С. 63–72.
- Алпысова В. А., Меркульев Ю. С. Влияние демпфирующего слоя на сейсмоустойчивость железнодорожного пути // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 6. С. 19–20. ISSN 0131–5765.
- Тюпин В. Н., Непомнящих Е. В. Воздействие землетрясения на железнодорожный путь // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 9. С. 24–26. ISSN 0131–5765.
- Тюпин В. Н. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах. Белгород : ИД «Белгород», 2017. 192 с.
- СП 270.1325800.2016. Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила оценки повреждений дорог при землетрясениях в отдаленных и труднодоступных районах URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044282> (дата обращения: 02.06.2021).
- СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054206> (дата обращения: 02.06.2021).
- Гусев Е. Л. Конструктивные методы синтеза слоисто-неоднородных структур при воздействии упругих волн // Акустический журнал. 2008. Т. 54. № 5. С. 807–815. ISSN 0320–7919.
- СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. URL: <https://docs.cntd.ru/document/550565571> (дата обращения: 02.06.2021).
- ОДМ 218.3.120-2020. Методические рекомендации по расчету насыпей автомобильных дорог на слабых грунтах основания с применением геосинтетических материалов. Москва : Росавтодор, 2020. 90 с.

## References

- Development strategy of the Russian Federation railway transport for the period up to 2030 [Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiiyskoy Federatsii do 2030 goda] : approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 17.06.2008 No. 877-r. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/1/1010> (access date: 02.06.2021).
- Alpysova V. A., Merkul'ev Yu. S. Influence of earthquake parameters on roadbed structure [Vliyanie parametrov zemletryaseniy na konstruktsiyu zemlyanogo polotna] // Modern methods of designing mainline railways as elements of nature-technical system : proceedings of the research and practice conference. Novosibirsk, November 21–22, 2013. Novosibirsk : Publishing House of STU, 2015. Pp. 63–72.
- Alpysova V. A., Merkul'ev Yu. S. Influence of damping layer on aseismic stability of railway track [Vliyanie demp'firuyushhego sloya na seismoustoychivost' zheleznodorozhnogo puti] // Railway Track and Facilities. 2015. No. 6. Pp. 19–20. ISSN 0131–5765.
- Tyupin V. N., Nepomnyashchikh E. V. Influence of earthquake on railway track [Vozdeystvie zemletryaseniya na zheleznodorozhnyy put'] // Railway Track and Facilities. 2008. No. 9. Pp. 24–26. ISSN 0131–5765.
- Tyupin V. N. Explosive and geomechanical processes in fissured and tense mountain massif [Vzryvnye i geomechanicheskie protsessy v treshhino-vatykh napryazhennykh gornykh massivakh]. Belgorod : Publishing House «Belgorod», 2017. 192 p.
- SP 270.1325800.2016. Transport constructions in seismic regions. Rules for assessment of damage of roads at earthquakes in remote and hardly accessible regions [SP 270.1325800.2016. Transportnye sooruzheniya v seismicheskikh rayonakh. Pravila otsenki povrezhdeniy dorog pri zemletryaseniyakh v otdalennykh i trudnoodistupnykh rayonakh]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044282> (access date: 02.06.2021).
- SP 22.13330.2016. Foundations of constructions [SP 22.13330.2016. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054206> (access date: 02.06.2021).
- Gusev E. L. Constructive Methods for Synthesizing Inhomogeneous Layered Structures under the Effect of Elastic Waves [Konstruktivnye metody sinteza sloisto-neodnorodnykh struktur pri vozdeystvii uprugikh voln] // Acoustic Journal. 2008. Vol. 54. No. 5. Pp. 807–815. ISSN 0320–7919.
- SP 14.13330.2018. Construction in seismic regions [SP 14.13330.2018. Stroitel'stvo v seismicheskikh rayonakh]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/550565571> (access date: 02.06.2021).
- Industry-specific road guidance 218.3.120-2020. Guidelines on calculation of road embankments on light soils in foundation with the use of geosynthetic materials [ODM 218.3.120–2020. Metodicheskie rekomendatsii po raschetu nasypey avtomobil'nykh dorog na slabykh gruntakh osnovaniya s primenением geosinteticheskikh materialov]. Moscow : Rosavtodor, 2020. 90 p.

Объем статьи 0,47 авторских листа

УДК 629.113

Татьяна Игоревна Кривцова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ), Иркутск, Россия,  
 Сергей Николаевич Кривцов, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ), Иркутск, Россия

## ИЗМЕНЕНИЕ СМАЗЫВАЮЩИХ СВОЙСТВ АВТОМОБИЛЬНЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ В ТЕЧЕНИЕ МЕЖСЕРВИСНОГО ПРОБЕГА

Tatyana Igorevna Krivtsova, PhD in Engineering, Associate Professor, Automobile Transport Department, Irkutsk National Research Technical University (INRTU), Irkutsk, Russia,

Sergey Nikolaevich Krivtsov, DSc in Engineering, Professor, Automobile Transport Department, Irkutsk National Research Technical University (INRTU), Irkutsk, Russia

### Change of lubricating properties of automobile motor oils during service interval mileage

#### Аннотация

Статья посвящена разработке метода контроля смазывающих свойств моторного масла в течение межсервисного пробега для выявления оптимального срока его замены в автомобиле. Так как условия эксплуатации автомобилей разные, не всегда нужно руководствоваться рекомендациями фирмы-производителя по периоду замены моторного масла в двигателях внутреннего сгорания. Наиболее рациональным и экономически оправданным будет метод замены по фактическому состоянию эксплуатационных жидкостей. В статье представлено разработанное оборудование — машина трения, предназначенная для измерения смазывающих свойств моторных масел по методу Тимкена, а также описана методика экспериментального исследования. Приведены протоколы измерений пятна контакта роликов для моторного масла Kixx 5W30 в зависимости от наработки автомобиля. Анализ данных позволяет заключить, что смазывающие свойства от увеличения пробега снижаются практически линейно и ухудшаются почти в 2 раза. Также для более детального выяснения причины снижения смазывающих свойств сделан спектральный анализ моторного масла, позволивший определить концентрацию продуктов износа в картерном масле. В целом проведенные исследования подтвердили возможность измерения смазывающих свойств для контроля фактического технического состояния моторных масел в процессе эксплуатации.

**Ключевые слова:** моторное масло, смазывающие свойства масел, машина трения, пятно износа, пробег автомобиля.

#### Summary

The paper is devoted to development of a method for control of lubricating properties of motor oil during service interval mileage for detecting optimal time of its change in an automobile. As automobiles have different operational conditions, it isn't always necessary to follow recommendations of a manufacturing company concerning the period of changing motor oil in internal combustion engines. A most rational and economically justified method is a method of changing oil according to actual condition of operating liquids. The paper presents developed equipment — friction machine aimed at measuring lubricating properties of motor oils by the Timken method. The paper also describes a method of an experimental study. The authors have presented a measurement protocol of a wear scar of rollers in dependence with operating time of an automobile. Data analysis enables to conclude that lubricating properties decrease almost linearly and deteriorate nearly by 2 times with mileage increase. Moreover, for more detailed clarification of reasons of lubrication properties deterioration the authors have carried out a spectral analysis of motor oil and determined a concentration of wear products in crankcase oil. As a result, studies have confirmed a possibility of measuring lubricating properties for control of actual technical condition of motor oils in operation.

**Keywords:** motor oil, lubricating properties of oils, friction machine, wear scar, mileage.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-84-89

Известно, что в процессе эксплуатации с увеличением наработки изменяются физико-механические свойства материалов, в том числе моторных масел. Это приводит к тому, что при определенных условиях смазочные жидкости могут перестать выполнять свои функции и требуют замены. Интервал замены моторных масел в большинстве случаев рекомендован производителем техники, однако может быть скорректирован в зависимости от условий эксплуатации [1]. Наиболее рациональный и экономически оправданный метод — замена по фактическому состоянию. Однако для этого свойства масел нужно периодически контролировать.

Изначально моторное масло должно обладать противозносными, моющими, диспергирующими, антиокислительными и другими свойствами [2, 3]. В связи с этим их можно контролировать и по отдельности, и комплексно. Но широкому внедрению таких методов проверки технического состояния препятствует высокая стоимость лабораторного оборудования и значительная трудоемкость анализа [4]. По этой причине поиск более доступного метода для рядовых условий эксплуатации остается актуальным.

Исходная предпосылка для периодического контроля свойств масла состояла в том, что главная задача моторной смазки — снижать износ двигателя.

В то же время контроль противоизносных свойств не представляет значительных трудностей и может быть реализован даже на относительно небольших автотранспортных предприятиях.

Экспериментальную проверку изменения смазывающих свойств моторных масел от пробега выполняли для автомобиля TOYOTA CARINA 1993 г. выпуска с двигателем внутреннего сгорания 5A-FE. При этом использовали синтетическое моторное масло Kixx 5W30. Для проведения экспериментов были взяты пробы моторных масел — от нулевого пробега автомобиля до пробега 12,5 тыс. км с интервалом отбора через каждые 2500 км.

Для определения смазывающих свойств разработана машина трения по методу Тимкена (рис. 1) с парой трения типа «неподвижный ролик — вращающийся подшипник». Этот метод широко используется в научно-исследовательских целях и при контроле качества смазочных материалов, в частности их антизадирных и противоизносных свойств, где в трении и изнашивании участвуют ролик и наружная обойма подшипника качения.

Основные узлы машины трения — электродвигатель, навешивающий элемент, ванна для смазочного материала, пульт управления. Вращающийся элемент — подшипник, который напрессован на вал электродвигателя (рис. 2).

Нагрузка на элементы трения передается через рукоятку, в которой установлены ролик подшипника и отражатель смазочного материала, чтобы при вращении обоймы масло не разбрызгивалось, а стекало обратно в ванну (рис. 3). Ванна для смазочного материала размещена на кронштейне так, чтобы подшипник был погружен в смазывающий материал.

Технические характеристики разработанной машины трения по методу Тимкена приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Технические характеристики машины трения

Параметр	Значение
Электродвигатель:	
мощность	0,55 кВт
частота вращения	1390 об/мин
Размеры машины трения (д×ш×в)	436×310×240 мм
Нагревательный элемент:	
мощность	40 Вт
максимальная температура нагрева	85 °C
Размеры ролика	
диаметр	7 мм
длина	21 мм
Размеры подшипника:	
диаметр	60 мм
длина	35 мм
Размеры ванны (д×ш×в)	90×75×40 мм

Машина трения управляется с помощью пульта, на котором находятся кнопки ВКЛ/ВЫКЛ электродвигателя, нагревательного элемента и цифрового термометра. Также установлен амперметр для фиксирования нагрузки на электродвигатель. Питание осуществляется от переменного тока напряжением от 220 В.

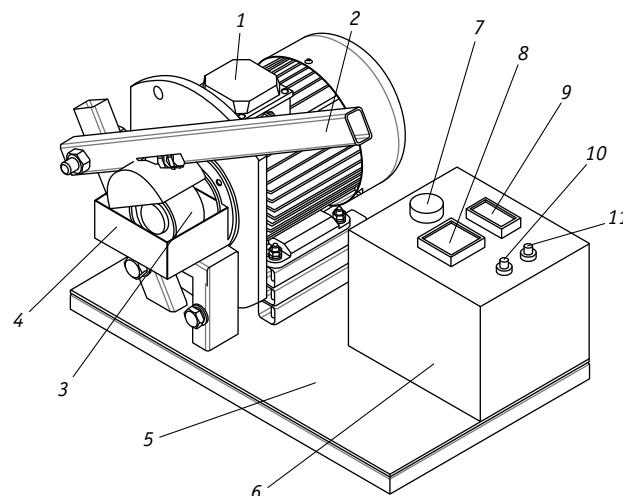


Рис. 1. Общий вид машины трения по методу Тимкена:

1 — электродвигатель; 2 — рукоятка; 3 — подшипник; 4 — ванна под смазочный материал; 5 — площадка; 6 — пульт управления; 7 — кнопка ВКЛ/ВЫКЛ электродвигателя; 8 — амперметр; 9 — цифровой термометр; 10 — кнопка ВКЛ/ВЫКЛ нагревательного элемента; 11 — кнопка ВКЛ/ВЫКЛ термометра

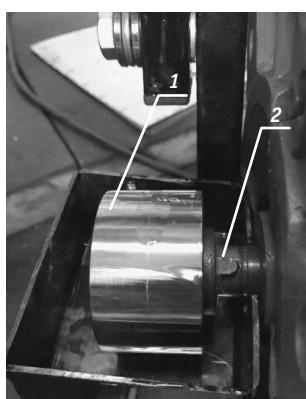


Рис. 2. Подшипник (1),  
напрессованный на вал  
электродвигателя (2)

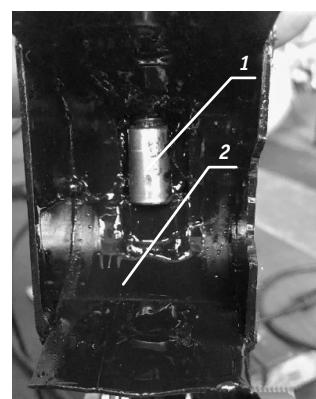


Рис. 3. Рукоятка  
с установленным роликом (1)  
и отражателем масла (2)

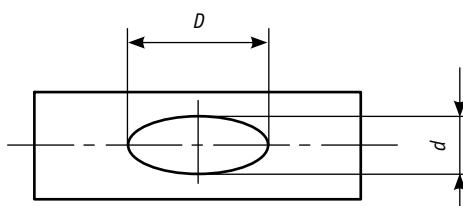


Рис. 4. Вид и характерные размеры пятна износа на ролике

Испытания проводили для двух температур — комнатной (около 22 °C) и 80 °C в течение 2 мин с одинаковой нагрузкой (2Н).

Смазывающие свойства смазочного материала оценивали по величине износа ролика, длине рубца  $D$  и ширине рубца  $d$  осей овала (рис. 4).

Обычно длину рубцов определяют с помощью электронного штангенциркуля, округляя результат измерения до 0,1 мм. Чтобы обеспечить минимальную погрешность, измерения проводят при хорошей освещенности, когда границы области пятна износа хорошо видны.

Площадь пятна износа (в виде овала) определяли по формуле

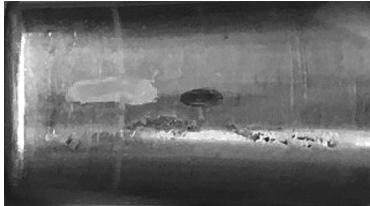
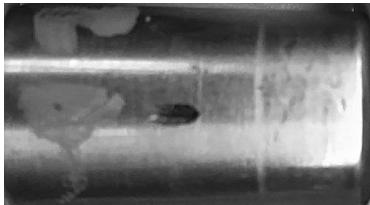
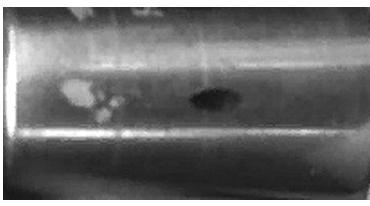
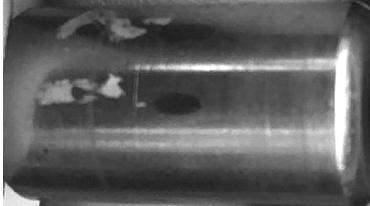
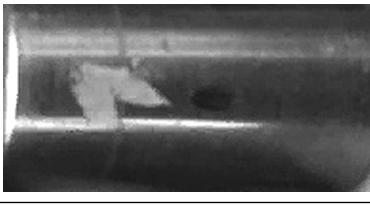
$$S = \pi \cdot \left( \frac{D}{2} \cdot \frac{d}{2} \right). \quad (1)$$

При испытании моторного масла с разным пробегом автомобиля сравнивали площади пятна износа с размерами пятна износа, полученного при работе на новом масле. При этом чем меньше геометрические размеры пятна износа, тем лучше смазывающие свойства масла. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

По данным табл. 2 построены графические зависимости площади пятна износа от пробега автомобиля (рис. 5).

Таблица 2

Протокол результатов эксперимента (смазывающий материал — синтетическое моторное масло Kixx 5W30)

Пробег автомобиля, км	Результаты эксперимента			
	Длина рубца, мм	Ширина рубца, мм	Площадь пятна износа, мм <sup>2</sup>	Фотография овала износа ролика
Температура смазочного материала $t = 22$ °C				
0	3,4	1,7	4,5	
2500	3,4	1,8	4,8	
5000	3,5	1,9	5,2	
7500	3,7	1,9	5,5	
10000	3,7	2	5,8	

Окончание табл. 2

Пробег автомобиля, км	Результаты эксперимента			
	Длина рубца, мм	Ширина рубца, мм	Площадь пятна износа, мм <sup>2</sup>	Фотография овала износа ролика
12500	3,8	2	6,0	
Температура смазочного материала $t = 80^{\circ}\text{C}$				
0	2,6	1,4	2,9	
2500	3	1,5	3,5	
5000	3,2	1,6	4,0	
7500	3,3	1,7	4,4	
10000	3,4	1,8	4,9	
12500	3,5	2	5,5	

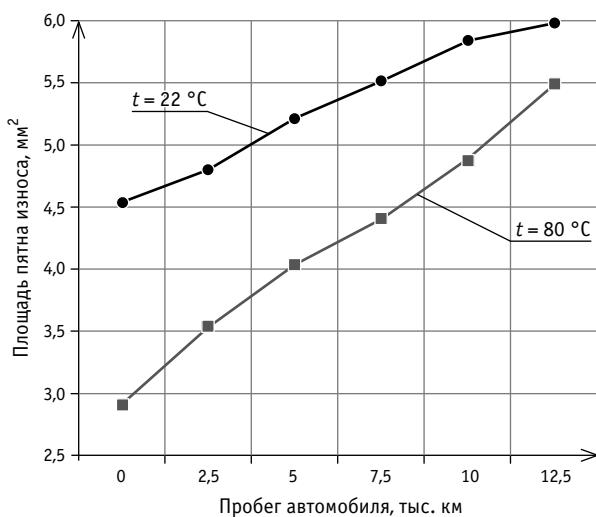


Рис. 5. График изменения смазывающих свойств моторного масла в зависимости от пробега автомобиля

Анализ рис. 5 позволяет заключить, что смазывающие свойства от увеличения пробега снижаются практически линейно и при температуре  $80^{\circ}\text{C}$  к пробегу 12,5 тыс. км ухудшаются почти в 2 раза. Это свидетельствует о срабатывании противоизносных присадок к базовому маслу.

Для более детального выяснения причины снижения смазывающих свойств выполнен спектральный анализ моторного масла Kixx без пробега и с пробегом автомобиля 12,5 тыс. км

(табл. 3). Спектральный анализ позволяет определить концентрацию продуктов износа в картерном масле и в ряде случаев, например при значительном повышении концентрации металлов в масле, указывает на неисправную работу взаимодействующих деталей двигателя.

По результатам спектрального анализа сделаны следующие выводы.

1. Щелочное число (TBN), характеризующее способность нейтрализовать кислоты, образующиеся в двигателе при сгорании топлива, для масла с пробегом уменьшилось с TBN = 10 мг KOH на 1 г до TBN = 6,2 мг KOH на 1 г, или почти на 40%.

2. Нитрация (образование в масле продуктов окисления азота  $\text{NO}_x$ ) относительно свежего масла (< 2 единиц) увеличилась более чем в 2 раза.

3. В отработанном масле выявлены фракции бензина.

4. Повышенное содержание молибдена с < 2 до 48 ppm свидетельствует об износе поршневых колец.

5. Уменьшение концентрации магния с 2243 до 212 ppm указывает на снижение моющих, нейтрализующих и диспергирующих свойств присадок.

6. Снижение концентрации цинка с 1200 до 784 ppm, а также фосфора с 476 до 224 ppm свидетельствует о срабатывании противоизносной присадки ZDDP.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили возможность измерения смазывающих свойств для контроля фактического технического состояния моторных масел в процессе эксплуатации.

Таблица 3

Результаты спектрального анализа моторного масла

Элементы износа, ppm						
Железо	Хром	Алюминий	Медь	Свинец	Олово	Ванадий
3/5	<2/<2	9/5	4/<2	<2/<2	<2/<2	6/6
Элементы загрязнений, ppm						
Кремний		Натрий			Калий	
25/5		7/6			24/13	
Элементы износа или присадок, ppm						
Титан	Молибден	Никель	Марганец	Бор		
0/0	<2/46	0/0	0/0	8/38		
Элементы присадок, ppm						
Магний	Кальций	Барий	Фосфор	Цинк		
2243/212	1259/2605	0/0	476/224	1200/784		
Загрязняющие вещества						
Топливо		Сажа	Вода	Гликоль		
x/<2		<0,1/x	<0,1/<0,1	-/-		
Физические свойства						
Нитрование	TBN	Окисление	V40C	V100C	Vindex	V40CLimit
<2/4	10/6,2	<2/-	59/61	9,9/11	153/175	50–68/50–68
						9,3–12,5/9,3–12,5
						C/C

Примечание. В числителе — данные без пробега, в знаменателе — с пробегом автомобиля 12,5 тыс. км.

## Литература

1. Лужнов Ю.М., Александров В.Д. Основы триботехники : учебное пособие / Под ред. Ю. М. Лужнова. Москва : МАДИ, 2013. 136 с.
2. Устройство для исследования триботехнических характеристик материалов / Г. М. Исмаилов, А. Е. Тюрин, Ю. А. Власов : патент 2600080 Российской Федерации. № 2015138515/28 ; заявл. 09.09.2015 ; опубл. 20.10.2016, Бюл. № 29.
3. Попов А. В. Изменение смазывающих свойств моторных масел при попадании воды и антифриза // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы международной научно-технической конференции / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень : ТИУ, 2015. С. 260–264.
4. Чокубаев О. А., Ляпина О. В., Власов Ю. А. Диагностика гидросистем карьерных самосвалов по параметрам работающего масла // Избранные доклады 62-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. Томск : ТГАСУ, 2016. С. 505–510.

Объем статьи 0,4 авторских листа

## References

1. Luzhnov Yu. M., Alexandrov V. D. Basics of tribotechnics [Osnovy tribotekhniki] : textbook / Ed. by Yu. M. Luzhnov. Moscow : MADI, 2013. 136 p.
2. Device for studying tribotechnical characteristics of materials [Ustroystvo dlya issledovaniya tribotekhnicheskikh kharakteristik materialov] / G. M. Ismailov, A. E. Tyurin, Yu. A. Vlasov : patent 2600080 Russian Federation. No. 2015138515/28 ; filed 09.09.2015 ; publ. 20.10.2016, Bulletin No. 29.
3. Popov A. V. Change of lubricating properties of materials at water and antifreeze ingress [Izmenenie smazivayushhih svoystv motornykh masel pri popadanii vody i antifriza] // Transport and transport-technological systems : proceedings of the International scientific and technical conference / Editor N. S. Zakharov. Tyumen : Industrial University of Tyumen, 2015. Pp. 260–264.
4. Chokubaev O. A., Lyapina O. V., Vlasov Yu. A. Diagnostics of hydraulic systems of mining dump trucks by parameters of operating oil [Diagnostika gidrosistem karyernykh samosvalov po parametram rabotayushhego masla] // Selected reports of the 62th University scientific and technical conference of students and young scientists. Tomsk : TSUAB, 2016. Pp. 505–510.

УДК 621.113.066

Юрий Васильевич Баженов, кандидат технических наук, профессор кафедры «Автомобильный транспорт»  
Владимирского государственного университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых (ВлГУ), Владимир, Россия,

Михаил Юрьевич Баженов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт»  
Владимирского государственного университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых (ВлГУ), Владимир, Россия,

Владимир Павлович Каленов, кандидат технических наук,  
руководитель отдела гарантии дилерского центра Peugeot, Владимир, Россия

## ОЦЕНКА БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ

Yuriy Vasilyevich Bazhenov, PhD in Engineering, Professor, Automobile Transport Department,  
Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VlSU), Vladimir, Russia,

Mikhail Yuryevich Bazhenov, PhD in Engineering, Associate Professor, Automobile Transport Department,  
Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VlSU), Vladimir, Russia,

Vladimir Pavlovich Kalenov, PhD in Engineering, Head of Quality Department,  
Peugeot Dealership, Vladimir, Russia

## Assessment of reliability of electronic engine control system

### Аннотация

В современных автомобилях оперативное управление рабочими процессами двигателей внутреннего сгорания осуществляет электронная система (ЭСУД), в которой под воздействием механических, химических и других процессов неизбежно возникают различные эксплуатационные повреждения. Для выявления и локализации этих повреждений предложена методика определения состояния ЭСУД с предварительной оценкой вероятности ее безотказной работы  $P(t)$ , которая позволяет установить возможность отказа системы на наработке до очередного регламентного технического обслуживания автомобиля. Значение показателя  $P(t)$  зависит от состояния конструктивных элементов ЭСУД и определяется соответствующими диагностическими параметрами.

Предложено уравнение регрессии, которое позволяет оценивать влияние значений диагностических параметров на параметр оптимизации и решение которого осуществляется с использованием методики планирования эксперимента. Для упрощения расчетов разработана компьютерная программа, которая по найденным при регламентном обслуживании диагностическим параметрам дает возможность определять вероятность безотказной работы ЭСУД и ее остаточный ресурс.

**Ключевые слова:** электронная система управления двигателем, вероятность безотказной работы, надежность, отказ, диагностирование.

### Summary

In modern automobiles operational control of work processes of internal combustion engines is executed by an electronic engine control system (EECS) in which operational damage inevitably arises due to influence of mechanical, chemical and other processes. In order to detect and localize the damage the authors suggest a method for determination of the EECS condition with a preliminary assessment of its no-failure probability  $P(t)$  that allows establishing a possibility of a system failure according to operating time up to next scheduled automobile maintenance. A value of the  $P(t)$  indicator depends on condition of the EECS structural elements and is determined by corresponding diagnostic parameters.

As a result, the authors suggest a regression equation that allows assessing influence of values of diagnostic parameters on an optimization parameter and the solution of which is conducted with the use of the experimental design method. In order to simplify calculations the authors have developed a computer program that gives a possibility to determine the probability of the EECS no-failure operation and its life according to diagnostic parameters gained at scheduled maintenance.

**Keywords:** electronic engine control system, probability of no-failure operation, reliability, failure, diagnostics.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-90-95

## ВВЕДЕНИЕ

**Д**ля управления работой механизмов и агрегатов современных автомобилей все более широко используются различные электронные устройства и компьютерные технологии. В двигателе внутреннего сгорания (ДВС), наиболее сложном и дорогостоящем агрегате автотранспортного средства, эту функцию выполняет электронная система (ЭСУД). Она оперативно регулирует все основные процессы в двигателе, такие как приготовление оптимальной по составу топливовоздушной смеси, дозирование ее подачи в цилиндры, своевременное воспламенение смеси, работа газораспределительного механизма, нейтрализация и рециркуляция вредных веществ в продуктах сгорания и т.д. [1, 2].

Функционирование ЭСУД основано на использовании электрических, электромагнитных, электронных, механических, тепловых и других физико-химических процессов. Поэтому при эксплуатации большинство исполнительных элементов ЭСУД испытывают различного рода нагрузки (силовые, динамические, тепловые и др.), что приводит к их эксплуатационным повреждениям и, как следствие, к серьезным нарушениям в работе двигателя. Например, при неисправностях электронной дроссельной заслонки или электродвигателя регулирования высоты подъема клапанов мощность ДВС снижается до 80–90%. При отказах топливного насоса низкого давления, датчика положения коленчатого вала, электронного блока управления блокируется подача топлива в цилиндры, и двигатель, естественно, не запускается. Повреждения датчиков, катушек зажигания, свечей, нейтрализатора выхлопных газов и других элементов ЭСУД приводят к увеличению расхода топлива и вредных веществ в выхлопных газах [3–5]. Поэтому исследования, направленные на повышение безотказности, одного из важнейших свойств надежности ЭСУД, актуальны и имеют большое практическое значение для предприятий автосервиса.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для снижения числа отказов ЭСУД целесообразно при техническом обслуживании (ТО) автомобилей контролировать ее техническое состояние с помощью современных контрольно-диагностических средств. Но с учетом того что ЭСУД включает в себя несколько десятков элементов (топливных насосов, электромагнитных клапанов, электромагнитных топливных форсунок, датчиков различного назначения и др.), за короткий промежуток времени практически невозможно объективно оценить состояние каждого из них.

В связи с этим при диагностировании ЭСУД рекомендуется вначале определять вероятность ее безотказной работы  $P(t)$  на интервале наработки до очередного регламентного обслуживания автомобиля по одному или нескольким диагностическим параметрам. В соответствии с теорией надежности вероятность безотказной работы, т.е. вероятность того, что в пределах заданной наработки не произойдет отказа изделия, является одним из основных показателей надежности любой технической системы [1, 6, 7]. Для многих деталей ЭСУД, которые относятся к классу невосстанавливаемых (свечи зажигания, датчики, электромагнитные клапаны, каталитические ней-

трализаторы и др.), безотказность одновременно характеризует и их долговечность, так как после отказа они подлежат замене.

Статистическая оценка вероятности безотказной работы  $\bar{P}(t)$  определяется по результатам обработки эксплуатационных испытаний представительной выборки обследований ЭСУД, которые проводят без замен или ремонтов ее конструктивных элементов, получивших какие-либо повреждения в период исследований. Тогда вероятность безотказной работы ЭСУД на интервале наработки от 0 до  $t$  может быть определена по формуле

$$\bar{P}(t) = [N - N_{\text{отк}}(t)] / N, \quad (1)$$

где  $N$  — объем выборки обследования (количество работоспособных ЭСУД на начало испытаний);

$N_{\text{отк}}$  — число ЭСУД, отказавших к моменту окончания испытаний  $t$ .

Статистическая оценка вероятности безотказной работы  $\bar{P}(t)$  достаточно полно характеризует эксплуатационную надежность ЭСУД, так как позволяет дать объективную оценку вероятности ее отказа  $F(t)$  на наработке до проведения очередного регламентного ТО. Величина вероятности безотказной работы определяется текущими значениями структурных параметров, которые в процессе эксплуатации могут изменяться в довольно широком диапазоне. Измерение структурных параметров ЭСУД (зазоров и люфтов в сопряжениях, износов рабочих поверхностей деталей, деформаций и др.) связано с определенными трудностями из-за необходимости выполнения разборочно-сборочных работ.

Для контроля состояния ЭСУД без разборки необходимо подобрать диагностические параметры, значения которых коррелируются со структурными и с достаточной степенью точности и достоверности оценивают ее техническое состояние. При этом число диагностических параметров определяется сложностью контролируемой электронной системы и ее конструктивных элементов.

В данной работе в качестве объектов исследования выбраны сложные ЭСУД 1.6 VTi Tiptronic, устанавливаемые на двигатели EP6DT автомобилей Peugeot, выпускаемых в России. Экспериментальные испытания по определению эксплуатационной надежности этих систем, оценке вероятности их безотказной работы, разработке методик и алгоритмов диагностирования их технического состояния проводились в дилерском центре «Авто Тракт Пежо» г. Владимира. Исследуемая ЭСУД 1.6 THP Turbo Tiptronic согласно функциональному назначению ее основных конструктивных элементов разделена на следующие четыре подсистемы, оцениваемые соответствующими диагностическими параметрами [8, 9].

1. Подсистема питания топливом (топливные насосы, датчики давления топлива, электромагнитные топливные форсунки). Оценивается отклонением давления топлива в топливной рампе  $P_{\text{дт}}$ .

2. Подсистема подачи воздуха (турбокомпрессор, электромагнитные клапаны, электронная дроссельная заслонка, датчик давления наддува). Оценивается отклонением давления воздуха во впускном коллекторе  $P_{\text{дв}}$ .

3. Подсистема изменения фаз газораспределительного механизма (ГРМ) (электродвигатель изменения высоты подъема клапанов ГРМ, электромагнитный клапан регулирования фаз ГРМ, датчики положения коленчатого и распределительного вала). Оценивается отклонением положения фазорегулятора впускного распределительного вала  $\phi_{\text{ГРМ}}$ .

4. Подсистема снижения токсичности отработавших газов (кatalитический катализатор, датчик содержания кислорода в отработавших газах). Оценивается коэффициентом коррекции топливоподачи  $K_{\text{кпп}}$ .

Выбранные параметры в полной мере удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям информативности, однозначности и стабильности и, как показывают результаты экспериментальных исследований, с заданной точностью и достоверностью оценивают состояние конструктивных элементов ЭСУД. Их нормативные значения, количественно оценивающие состояние системы, являются необходимыми элементами в управлении ее работоспособностью.

Номинальные (начальные) значения диагностических параметров находились как средние их величины по результатам измерений технически исправных ЭСУД и после статистической обработки данных составили:  $P_{\text{двн}} = 40$  мбар;  $P_{\text{дтн}} = 3$  бар;  $\phi_{\text{ГМН}} = 2$  °ПКВ;  $K_{\text{кпп}} = 1,5\%$ . Предельные нормативы диагностических параметров, соответствующие предотказному состоянию ЭСУД, устанавливаются техническими условиями заводов-изготовителей на стадии разработки и доводочных испытаний. Для ЭСУД 1.6 VTi Tiptronic они составили:  $P_{\text{двн}} = 100$  мбар;  $P_{\text{дтн}} = 9$  бар;  $\phi_{\text{ГМН}} = 7$  °ПКВ;  $K_{\text{кпп}} = 6,2\%$  [2].

При определении вероятности безотказной работы по измеренным значениям диагностических параметров в исследовании использована методика планирования эксперимента [10, 11]. В качестве параметра оптимизации принята статистическая оценка вероятности безотказной работы  $\bar{P}(t)$ , которая однозначно определяет его количественную оценку для различных состояний ЭСУД, а факторами являются диагностические параметры, выбранные для определения технического состояния ЭСУД.

В закодированном виде зависимость вероятности безотказной работы ЭСУД от выбранных для оценки ее технического состояния диагностических параметров с удовлетворительной точностью описывается полиномом первой степени (уравнением регрессии):

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4, \quad (2)$$

где  $y$  — параметр оптимизации (вероятность безотказной работы ЭСУД);

$b_0$  — свободный член уравнения;

$b_i$  — коэффициенты, учитывающие влияние  $i$ -го диагностического параметра (фактора) на функцию  $y$ ;

$x_1, \dots, x_4$  — кодированные значения диагностических параметров.

Исходными данными для определения кодированных в математической модели (2) диагностических параметров  $x_i$  и коэффициентов их влияния  $b_i$  на параметр оптимизации служат

значения вероятностей возникновения отказов при различных сочетаниях независимых факторов (значений диагностических параметров), которые определяются по результатам статистической обработки экспериментальных данных.

При построении плана эксперимента по оценке вероятности безотказной работы ЭСУД необходимо прежде всего определить основной уровень и интервал варьирования каждого независимого фактора. Для исследуемой системы в качестве верхних уровней варьирования факторов (ВУ) приняты предельные значения диагностических параметров ( $P_{\text{дтп}}$ ,  $P_{\text{двн}}$ ,  $\phi_{\text{ГМН}}$ ,  $K_{\text{кпп}}$ ), а в качестве нижних (НУ) — их номинальные (начальные) величины ( $P_{\text{двн}}$ ,  $P_{\text{дтн}}$ ,  $\phi_{\text{ГМН}}$ ,  $K_{\text{кпп}}$ ). Основной (нулевой) уровень фактора (ОУ) представляет собой половину суммы верхнего и нижнего уровней, т.е.  $\text{ОУ} = (\text{ВУ} + \text{НУ})/2$ . Разность между основным и верхним (или нижним) уровнем представляет собой интервал варьирования фактора  $I = \text{ОУ} - \text{НУ}$ .

Значения уровней независимых факторов, найденные при обработке экспериментальных данных по оценке эксплуатационной надежности ЭСУД 1.6 VTi Tiptronic двигателя EP6DT, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения уровней независимых факторов  
(диагностических параметров,  
оценывающих состояние ЭСУД) в натуральном виде

Уровни факторов	Независимые факторы			
	$P_{\text{дтн}}$ бар	$P_{\text{двн}}$ мбар	$\phi_{\text{ГМН}}$ °ПКВ	$K_{\text{кпп}}$ , %
ВУ	9	100	7	6,2
ОУ	6	70	4,5	3,85
ИУ	3	30	2,5	2,35
НУ	3	40	2	1,5

Начальный этап планирования эксперимента для получения линейной зависимости вероятности безотказной работы от диагностических параметров состоит в построении матрицы, каждая строка которой содержит условия проведения одного опыта: номер опыта, верхние и нижние уровни фактора  $x_i$ , а также найденное в результате этого опыта кодированное значение параметра оптимизации  $y$  (табл. 2). Число опытов, необходимое для реализации всех возможных сочетаний уровней факторов, определяется по формуле

$$N = 2^n = 2^4 = 16, \quad (3)$$

где  $N$  — число опытов;

$n$  — число факторов (диагностических параметров);

2 — число уровней варьирования факторов.

Для упрощения построения матрицы и обработки результатов экспериментальных данных верхний уровень факторов принимается равным +1, нижний —1, основной равным 0. Фрагмент матрицы планирования эксперимента вместе с буквенными обозначениями каждой строки (опыта) для принятого в работе объекта исследования приведен в табл. 2.

Таблица 2

Фрагмент матрицы планирования эксперимента

№ опыта	Уровни кодированных факторов				Буквенное обозначение строк	y
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$		
1	+1	+1	+1	+1	$abcd$	$y_1$
2	-1	+1	+1	+1	$bcd$	$y_2$
3	+1	-1	+1	+1	$acd$	$y_3$
4	-1	-1	+1	+1	$cd$	$y_4$
5	+1	+1	-1	-1	$abd$	$y_5$
6	-1	+1	-1	+1	$bd$	$y_6$

Построенная матрица представляет собой полный факторный эксперимент, который включает 16 опытов и все возможные комбинации уровней четырех факторов, выбранных для оценки состояния ЭСУД. Кодированное значение каждого из них определяется по формуле

$$x_i = (H_i - \text{OY}_i) / I_i, \quad (4)$$

где  $H_i$  — натуральное и кодированное значения  $i$ -го фактора;  $\text{OY}_i$  — натуральное значение основного уровня фактора;  $I_i$  — интервал варьирования фактора;  $i$  — наименование фактора.

При известных уровнях факторов (см. табл. 1) кодированные значения выбранных для оценки состояния ЭСУД параметров  $P_{\text{дв}}$ ,  $P_{\text{дт}}$ ,  $\Phi_{\text{ГМ}}$ ,  $K_{\text{КП}}$  могут быть определены из выражений:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{P_{\text{дв}} - 70}{30}; \quad x_2 = \frac{P_{\text{дт}} - 6}{3}; \\ x_3 &= \frac{\Phi_{\text{ГМ}} - 4,5}{2,5}; \quad x_4 = \frac{K_{\text{КП}} - 3,85}{2,35}. \end{aligned} \quad (5)$$

По результатам эксперимента статистические оценки коэффициентов  $b_i$  линейной модели (2), учитывающие влияние  $i$ -го фактора на параметр оптимизации, находятся из выражения

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j, \quad i = 0, 1, \dots, 4, \quad (6)$$

где  $i$  — наименование фактора (диагностического параметра);  $j$  — номер опыта (строки) в матрице планирования;

$y_j$  — значение параметра оптимизации в  $j$ -м опыте;

$x_{ij}$  — кодированное значение  $i$ -го фактора ( $\pm 1$ ) в  $j$ -м опыте.

Подставив в выражение (6)  $i = 0$ , получим формулу для вычисления свободного члена линейной модели  $b_0$ :

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j. \quad (7)$$

Кодирование факторов позволяет существенно упростить расчет коэффициентов модели. Например, выражение (6) для определения коэффициентов  $b_1$  и  $b_2$  запишется как

$$b_1 = \frac{(+1)y_1 + (-1)y_2 + (+1)y_3 + \dots + (-1)y_{16}}{16};$$

$$b_2 = \frac{(-1)y_1 + (-1)y_2 + (+1)y_3 + \dots + (-1)y_{16}}{16}.$$

Рассчитанные таким же образом остальные коэффициенты математической модели в закодированном виде, определяющие зависимость вероятности безотказной работы ЭСУД от выбранных для оценки ее состояния диагностических параметров, составляют:  $b_0 = 50,06$ ;  $b_1 = 10,94$ ;  $b_2 = 18,45$ ;  $b_3 = 13,45$ ;  $b_4 = 6,94$ . Тогда уравнение регрессии (2) примет вид

$$y = 50,06 + 10,94x_1 + 18,45x_2 + 13,45x_3 + 6,94x_4. \quad (8)$$

При расчете безотказности ЭСУД на заданной наработке с использованием матрицы планирования эксперимента в качестве параметра оптимизации удобнее использовать не вероятность безотказной работы  $P(t)$ , а статистическую оценку вероятности ее отказа  $F(t)$ . Тогда уравнение регрессии в натуральном обозначении факторов, определяющее зависимость отказа ЭСУД от принятых диагностических параметров, примет следующий вид:

$$F(t) = -72,4 + 0,55P_{\text{дв}} + 9,23P_{\text{дт}} + 8,97\Phi_{\text{ГМ}} + 3,47K_{\text{КП}}. \quad (9)$$

Полученное с использованием методики планирования эксперимента регрессионное уравнение позволяет рассчитать по текущим значениям диагностических параметров вероятность отказа ЭСУД на наработке до очередного регламентного ТО. Например, при диагностировании ЭСУД 1.6 VTi Tiptronic автомобиля Peugeot 408 на пробеге 100 тыс. км (Т0-5) получены следующие значения диагностических параметров:  $P_{\text{дв}} = 74$  мбар;  $P_{\text{дт}} = 3,6$  бар;  $\Phi_{\text{ГМ}} = 3,4$  °ПКВ;  $K_{\text{КП}} = 5,02$ .

Статистические оценки вероятности возникновения отказа ЭСУД и вероятности ее безотказной работы до очередного регламентного обслуживания автомобиля (Т0-6) при этих значениях диагностических параметров составят:

$$\begin{aligned} \bar{F}(t) &= \frac{-72,4 + 0,55 \cdot 74 + 9,23 \cdot 3,6 + 8,97 \cdot 3,4 + 3,47 \cdot 5,02}{100\%} = 0,49; \\ \bar{P}(t) &= 1 - \bar{F}(t) = 1 - 0,49 = 0,51. \end{aligned}$$

Электронная система управления работой ДВС не относится к элементам автомобиля, состояние которых влияет на безопасность движения. Для этих элементов допустимая вероятность безотказной работы принимается равной  $P_d(t) = 0,80$  [1, 7]. Такой уровень безотказности гарантирует остаточный ресурс системы не ниже периодичности регламентного обслуживания автомобиля ( $t_{\text{ост}} \geq t_p$ ). В связи с тем что вероятность безотказной работы ЭСУД меньше допустимого значения  $\{P(t) < P_d(t)\}$ , она нуждается в углубленном диагностировании для выявления и устранения появившихся в ее конструктивных элементах повреждений.

В процессе поиска и локализации возникающих в ЭСУД повреждений персонал, осуществляющий диагностирование

технического состояния, вынужден обрабатывать большой массив информации. Поэтому для практического использования представленной методики разработана компьютерная программа, позволяющая по найденным при регламентном обслуживании диагностическим параметрам определять вероятность безотказной работы ЭСУД на заданном интервале наработки  $P(t)$  и остаточный ресурс  $t_{ост}$ . Программа включает в себя базы данных о состоянии ЭСУД, обслуживаемых в дилерском центре «Авто Тракт Пежо», нормативных значениях диагностических параметров, оценивающих техническое состояние, рекомендуемых технических воздействиях по ТО и ремонту при отклонении диагностических параметров от нормативных значений. Алгоритм этой программы, устанавливающий оптимальную последовательность операций углубленного диагностирования ЭСУД 1.6 VTi Tiptronic, представлен на рис. 1.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Чтобы обеспечить надежную работу электронных систем управления двигателем, при регламентном обслуживании автомобилей необходимо проведение контрольно-диагностических работ. Одной из важнейших задач диагностирования ЭСУД является оценка запаса ее исправной работы, которая гарантировала бы безотказность системы до очередного ТО.

По результатам проведенных исследований в качестве такой оценки предложена и обоснована вероятность безотказной работы, значение которой определяется выбранными для этой цели диагностическими параметрами. Для упрощения расчетов, связанных с определением вероятности безотказной работы ЭСУД и выполнением при необходимости углубленного диагностирования ее подсистем, разработана и апробирована на примере электронных систем 1.6 VTi Tiptronic компьютерная программа.

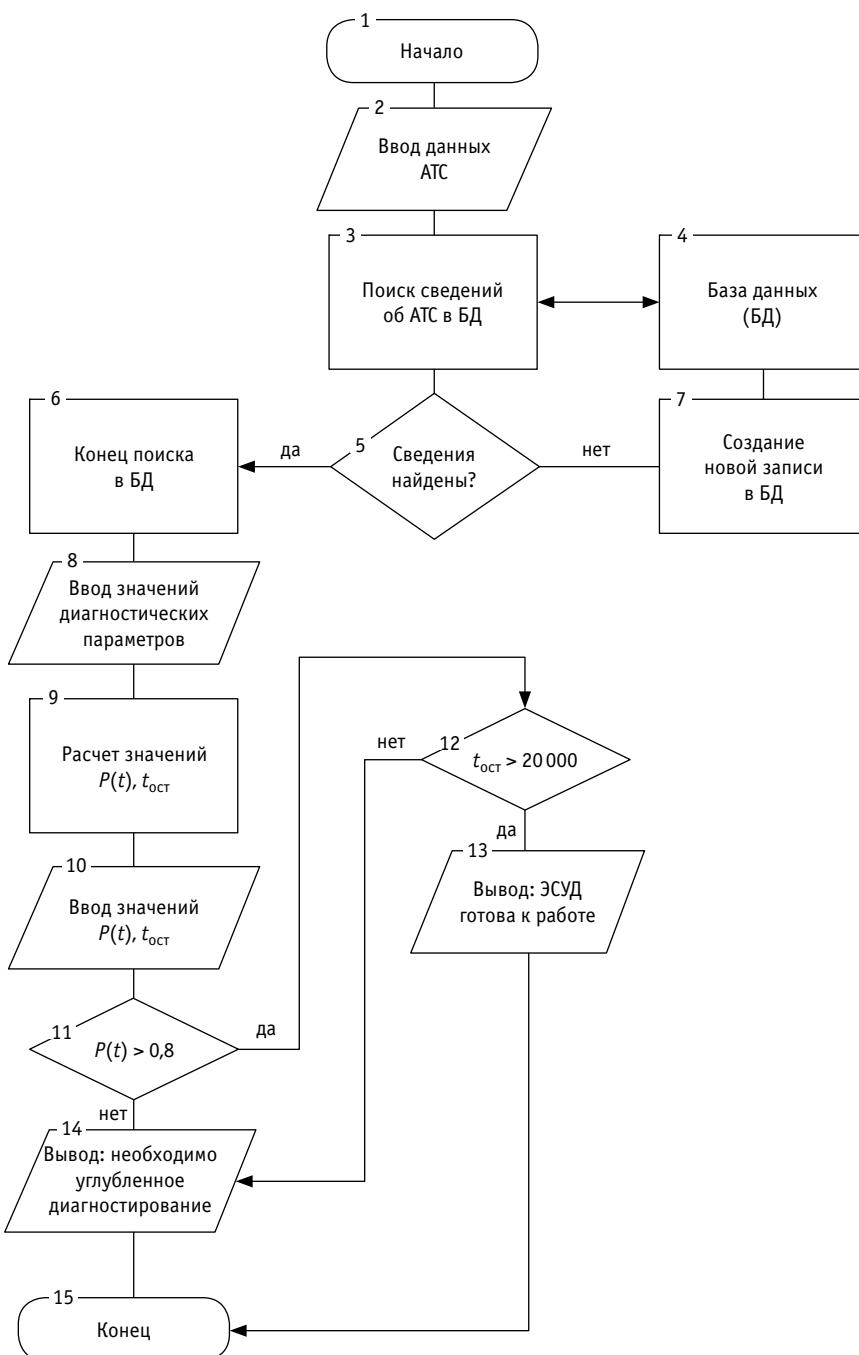


Рис. 1. Алгоритм программы диагностирования технического состояния ЭСУД

## Литература

1. Баженов Ю. В., Баженов М. Ю. Основы теории надежности машин : учебное пособие. Москва : ФОРУМ ; ИНФРА-М, 2021. 315 с.
2. PEUGEOT. SERVICE BOX. URL: <https://servicebox.peugeot.com> (дата обращения: 19.10.2019).
3. Рэндалл М. Электрическое и электронное оборудование автомобилей. Москва : Алфамер Паблишинг, 2008. 284 с.
4. Яковлев В. Ф. Диагностика электронных систем автомобиля : учебное пособие. Москва : СОЛОН-Пресс, 2003. 272 с.
5. Хернер А., Риль Х. Автомобильная электрика и электроника. Москва : За рулем, 2013. 625 с.
6. ГОСТ 27.00–2015. Надежность в технике. Термины и определения. Москва : Стандартинформ, 2016. 22 с.
7. Стуканов В. А., Барышников А. А. Надежность и техническая диагностика автотранспортных средств : учебное пособие. Москва : ФОРУМ ; ИНФРА-М, 2019. 420 с.
8. Баженов Ю. В., Каленов В. П. Техническое обслуживание электронных систем управления двигателем // Электроника и электрооборудование транспорта. 2019. № 1. С. 30–33. ISSN 1812–6782.
9. Каленов В. П. Разработка системы обеспечения работоспособности электронных систем управления двигателем в эксплуатации : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2019.
10. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва : Наука, 1976. 278 с.
11. Сидняев Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. Москва : Юрайт, 2011. 399 с.

## References

1. Bazhenov Yu. V., Bazhenov M. Yu. Basics of theory of machines reliability [Osnovy teorii nadezhnosti mashin] : textbook. Moscow : FORUM ; INFRA-M, 2021. 315 p.
2. PEUGEOT. SERVICE BOX. URL: <https://servicebox.peugeot.com> (access date: 19.10.2019).
3. Randall M. Electric and electronic equipment of automobiles [Elektricheskoe i elektronnoe oborudovanie avtomobiley]. Moscow : Alfamer Publishing, 2008. 284 p.
4. Yakovlev V. F. Diagnostics of automobile electronic systems [Diagnostika elektronnykh sistem avtomobilya] : textbook. Moscow : SOLON-Press, 2003. 272 p.
5. Herner A., Riehl H. Automobile electrics and electronics [Avtomobil'naya elektrika i elektronika]. Moscow : At the wheel, 2013. 625 p.
6. GOST 27.00–2015. Dependability in technics. Terms and definitions [Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya]. Moscow : Standardinform, 2016. 22 p.
7. Stukanov V. A., Baryshnikov A. A. Reliability and technical diagnostics of automobiles [Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika avtovtansportnykh sredstv] : textbook. Moscow : FORUM ; INFRA-M, 2019. 420 p.
8. Bazhenov Yu. V., Kalenov V. P. Maintenance of electronic engine control systems [Tekhnicheskoe obsluzhivanie elektronnykh sistem upravleniya dvigatelym] // Electronics and electrical equipment of transport. 2019. No. 1. Pp. 30–33. ISSN 1812-6782.
9. Kalenov V. P. Development of supporting system for electronic engine control systems in operation [Razrabotka sistemy obespecheniya rabotosposobnosti elektronnykh sistem upravleniya dvigatelym v ekspluatacii] : PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2019.
10. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskiy Yu. V. Experimental design at search for optimal conditions [Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy]. Moscow : Science, 1976. 278 p.
11. Sidnyaev N. I. Theory of experimental design and analysis of statistical data [Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh]. Moscow : Urait, 2011. 399 p.

Объем статьи 0,64 авторских листа

УДК 625.7

Денис Евгеньевич Болтнев, соискатель кафедры информационной безопасности Воронежского государственного университета инженерных технологий (ВГУИТ), Воронеж, Россия,

Ирина Алевтиновна Высоцкая, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационной безопасности Воронежского государственного университета инженерных технологий (ВГУИТ), Воронеж, Россия,

Алексей Васильевич Скрыпников, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационной безопасности, декан факультета управления и информатики в технических системах Воронежского государственного университета инженерных технологий (ВГУИТ), Воронеж, Россия,

Андрей Николаевич Брюховецкий, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой тракторов и автомобилей Луганского государственного аграрного университета (ЛГАУ), Луганск,

Петр Викторович Тихомиров, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой транспортно-технологических машин и сервиса Брянского государственного инженерно-технологического университета (БГИТУ), Брянск, Россия

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ЛЕСОВОЗНОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ НА ПОДЪЕМАХ

Denis Evgenyevich Boltnev, applicant, Information Security Department,  
Voronezh State University of Engineering Technologies (VSUET), Voronezh, Russia,

Irina Alevtinovna Vysotskaya, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Information Security Department,  
Voronezh State University of Engineering Technologies (VSUET), Voronezh, Russia,

Alexey Vasilyevich Skrypnikov, DSc in Engineering, Professor, Head of Information Security Department,  
Dean of Faculty of Control and Information Technologies in Technological Systems,  
Voronezh State University of Engineering Technologies (VSUET), Voronezh, Russia,

Andrey Nikolaevich Bryukhovetskiy, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Tractors and Cars Department,  
Lugansk National Agrarian University (LNAU), Lugansk,

Petr Viktorovich Tikhomirov, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Transport and Technological Machines  
and Service Department, Bryansk State Engineering and Technological University (BSETU), Bryansk, Russia

### Designing of a longitudinal profile of a forest automobile road on increases

#### Аннотация

В статье рассматривается сочетание отдельных участков лесовозной автомобильной дороги с разными уклонами проектной линии, обеспечивающее преодоление подъема по возможности на прямой передаче. Предлагается способ расчета, который позволяет быстро и без сложных вычислений выбирать лучшие варианты проектной линии с целью максимального использования автомобиля и минимального расхода топлива. Данный способ рекомендуется для применения при проектировании продольного профиля в пересеченной местности.

**Ключевые слова:** лесовозные автомобильные дороги, проектная линия на подъемах, проектирование дорог, план трассы, продольный профиль трассы.

#### Summary

The paper proposes a method for calculating the project line on the rise. A combination of individual sections with different slopes of the project line is considered, which ensures that the timber carrier can overcome the rise, if possible, in a direct drive. The given method of calculating the project line on the ascent makes it possible to quickly, without complicated calculations, choose the best options for the project line, ensuring maximum use of the vehicle with minimum fuel consumption. It is advisable to recommend the mentioned calculation method to design organizations for the design of a longitudinal profile in a broken area.

**Keywords:** logging highways, project line on uphill's, road design, route plan, longitudinal profile of the route.

## ВВЕДЕНИЕ

При проектировании положение проектной линии на подъемах следует выбирать по некоторому определенному критерию. Этот критерий должен обеспечивать оптимальное использование динамических качеств лесовозного подвижного состава и удобную езду на подъеме.

В статье рассматривается сочетание отдельных участков с разными уклонами проектной линии, позволяющее лесовозу преодолевать подъем по возможности на прямой передаче. При этом скорость движения в конечной точке подъема не должна быть ниже критической для данной передачи. Предложенный в настоящей работе критерий обеспечивает преодоление подъема без переключения передач, что достигается за счет снижения скорости с максимальным использованием силы тяги двигателя и накопленной перед подъемом кинетической энергии.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЕКТНОЙ ЛИНИИ НА ПОДЪЕМАХ

Проектная линия на подъеме может состоять всего лишь из одного участка, иметь постоянный уклон [1] или представлять собой сочетание нескольких участков с различной длиной и величиной уклонов. Длина участков и величина уклонов главным образом зависят от рельефа местности, но тем не менее должны обеспечивать хорошие условия движения автомобилей [1, 2].

Предлагается следующий порядок проектирования проектной линии на подъемах.

Прежде всего определяется подходная к подъему скорость движения автомобиля. Далее определяется коэффициент качания автомобиля [1, 3]. Затем проектируется продольный профиль: подбирается длина отдельных участков с соответствующими уклонами в зависимости от скорости движения лесовоза в конце рассматриваемого участка. Длину отдельных участков и их уклоны необходимо выбирать так, чтобы после участка, имеющего более крутой подъем (в конце которого скорость движения автомобиля снижается до критической), следовал участок с более пологим уклоном, где можно разогнать лесовоз либо обеспечить его равномерное движение. Если на первом участке скорость движения лесовоза не снижается до критической, то на следующем можно продолжать дальнейшее снижение скорости, но не ниже критической для данной передачи в конце участка.

С использованием графического метода можно определить длину участков, на которых происходит затухание скорости движения автомобиля, при любой начальной и конечной скоростях в интервале изменения от 70 до 30 км/ч, при дорожных сопротивлениях от  $\Psi = 0,10$  до  $\Psi = 0,06$  и разной степени подачи топлива (табл. 1).

Элементы проектной линии рассчитываются следующим образом. В зависимости от условий рельефа местности на продольном профиле наносится первый участок проектной линии, определяются его уклон, суммарное сопротивление и необходимая степень подачи. Затем по соответствующему графику определяется скорость движения автомобиля в конце участка.

Следует иметь в виду: для того чтобы вертикальные кривые вписывались в продольный профиль, длина отдельных участков при вогнутом профиле должна быть не менее 100–200, а при выпуклом — не менее 200–300 м.

Таблица 1

Длина затяжных подъемов в зависимости от дорожных сопротивлений, скорости движения и степени подачи топлива для прямой передачи лесовоза на базе автомобиля КАМАЗ 53229

Дорожные сопротивления $\Psi$	Скорость движения, км/ч	Степень подачи топлива			
		в начале подъема $V_1$	в конце подъема $V_2$	1,0	0,8
				0,6	0,4
0,10	30,0	70,0	60,0	238,0	272,0
				246,0	216,0
				192,0	175,0
				129,0	111,0
0,09	30,0	50,0	40,0	60,0	54,0
				51,0	48,0
				351,0	326,0
				288,0	249,0
0,08	30,0	70,0	60,0	250,0	232,0
				207,0	100,0
				158,0	132,0
				75,0	62,0
0,07	30,0	50,0	40,0	442,0	407,0
				391,0	295,0
				321,0	256,0
				218,0	175,0
0,06	30,0	70,0	60,0	205,0	186,0
				155,0	146,0
				98,0	89,0
				79,0	67,0
0,07	30,0	50,0	40,0	610,0	542,0
				449,0	301,0
				451,0	334,0
				297,0	220,0
0,06	30,0	70,0	60,0	146,0	125,0
				108,0	98,0
				826,0	629,0
				488,0	358,0
0,06	30,0	50,0	40,0	782,0	628,0
				484,0	346,0
				333,0	244,0
				292,0	174,0

Для определения эксплуатационных показателей движения лесовоза на вертикальных кривых можно применить один из способов, предложенных Е. В. Кондрашовой или В. К. Курьяновым [3, 4], например аналитическое вычисление скорости движения автомобиля в зависимости от уклонов.

Однако данный способ не учитывает фактический режим движения лесовоза (переменность степени подачи топлива) и не позволяет рассчитать расход топлива, поэтому полной картины движения лесовоза по вертикальным кривым получить нельзя.

Упомянутый способ определения эксплуатационных показателей движения автомобиля по вертикальным кривым может найти широкое применение при расчетах проектной линии в равнинной или слабо пересеченной местности, где проектная линия прокладывается по обертывающей линии и в продольном профиле преобладают вертикальные кривые.

Несмотря на одну и ту же разность между высотными отметками, варианты проектной линии могут иметь одинаковую или разную длину. Поэтому при проектировании следует использовать показатели, которые не только характеризуют тот или иной вариант, но и позволяют выбрать лучший из них.

Для сравнения и выбора вариантов проектной линии на подъемах нами приняты следующие показатели.

1. Скорость движения лесовоза в конечной точке подъема ( $V_2$ , км/ч) при условии, что все варианты имеют одинаковую скорость движения в начале подъема ( $V_1$ , км/ч).

2. Продолжительность движения лесовоза от начальной до конечной точки подъема ( $T, с$ ).

### 3. Суммарный расход топлива при преодолении подъема ( $O_1$ , г).

4. Время, необходимое для преодоления участка единичной длины на подъеме ( $T/S$ , с/м).

5. Расход топлива для преодоления участка единичной длины на подъёме ( $Q/S$  г/м).

На рис. 1 представлен участок продольного профиля с вертикальной кривой, разделенной на расчетные участки. Расчет эксплуатационных показателей движения лесовоза на этом участке приведен в табл. 2, где  $S$  — длина дорожного участка,  $f$  — коэффициент сопротивления качению колес,  $k$  — коэффициент обтекаемости автомобиля,  $a$  — удельный расход топлива

Если варианты проектной линии имеют одинаковую длину при одной и той же разнице между высотными отметками, то для их сравнения достаточно первых трех показателей. Если длина вариантов проектной линии разная, при сравнении вариантов необходимо использовать все показатели.

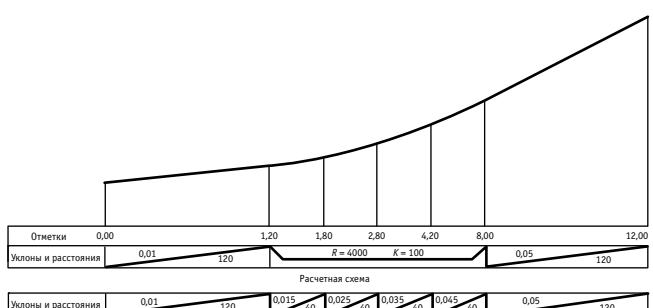


Рис. 1. Эксплуатационные показатели движения лесовоза на вертикальной кривой

Лучшим вариантом проектной линии на подъеме следует считать тот, в конце которого будет достигнута максимальная скорость движения автомобиля, т.е. на преодоление которого будет затрачено наименьшее количество времени и, следовательно, израсходовано наименьшее количество топлива.

Положение проектной линии на подходах к подъему, а также после подъема обычно не представляет больших трудностей. В таких случаях проектная линия проводится по общим правилам. Что касается положения проектной линии на подъеме, оно может иметь несколько вариантов, из которых проектировщик должен выбрать лучший, т.е. тот, который наиболее полно удовлетворяет требованиям лесовозного автомобильного транспорта [1, 5, 6].

Способ расчета элементов проектной линии, предлагаемый в статье, может успешно применяться при проектировании продольного профиля в пересеченной местности, где в профиле преобладают участки с постоянными уклонами. В то же время с некоторым приближением его можно использовать при проектировании продольного профиля и в других случаях, например в горной местности или для железнодорожной линии.

## Выводы

Представленный способ расчета проектной линии на подъемах дает возможность быстро и без сложных расчетов выбирать наилучшие варианты проектной линии, обеспечивающие максимальное использование автомобиля и минимальный расход топлива.

Основные принципы предлагаемого способа можно сформулировать следующим образом.

Вначале выбирается подходная к подъему скорость движения. Определяется коэффициент качения автомобиля  $f$ . Затем на данном подъеме наносится несколько (2–3) рациональных вариантов проектной линии, каждый из которых состоит из ряда разных по длине и с разными уклонами участков. Далее по известным коэффициентам качения и уклонам для всех участков устанавливаются коэффициенты дорожных сопротивлений  $\Psi$ , на основе которых подбирается степень подачи топлива. В дальнейшем для каждого варианта проектной линии по составляющим ее отдельным участкам определяются эксплуатационные показатели движения лесовоза.

Лучшим вариантом проектной линии на подъеме следует считать тот, в конце которого затрачено наименьшее количество топлива. Если же длина проектной линии отдельных вариантов неодинакова, то лучшим будет тот вариант, на преодоление длины которого затрачено наименьшее время и наименьшее количество топлива.

Таблица 2

### Показатели движения лесовоза

№ участка	$S, \text{м}$	$f$	$\Psi$	$k$	$V_1, \text{км/ч}$	$V_2, \text{км/ч}$	$T, \text{с}$	$q_s, \text{г/с}$	$Q, \text{г}$
1	120,0	0,02	0,03	0,6	50,0	50,8	8,7	3,67	31,9
2	40,0	0,02	0,035	0,6	50,8	50,8	2,7	3,70	10,0
3	40,0	0,02	0,045	0,8	50,8	50,4	2,8	4,10	11,5
4	40,0	0,02	0,055	0,8	50,4	49,6	2,9	4,06	11,7
5	40,0	0,02	0,065	1,0	49,6	47,9	3,0	4,44	13,3
6	120,0	0,02	0,07	1,0	47,9	39,7	10,0	4,07	40,7
Итого по участку					50,0	39,7	30,1	—	119,1

## Литература

1. Литвинов А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля. Москва : Машиностроение, 1971. 416 с.
2. Рабочая гипотеза ритмичного строительства лесовозных автомобильных дорог и ее экономико-математическое развитие / Д. В. Бурмистров, А. В. Скрыпников, В. Г. Козлов [и др.] // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2018. Т. 22. № 5. С. 69–76. ISSN 2542–1468.
3. Вырко Н. П. Строительство и эксплуатация лесовозных дорог : учебник. Минск : БГТУ, 2005. 446 с.
4. Theoretical foundations of the method of designing a clothoid track with approximation of succession of points / A. V. Skrypnikov, V. G. Kozlov, A. N. Belyaev, E. V. Chernyshova // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 726. Pp. 654–667.
5. Формирование оптимальных схем этапного развития лесовозных автомобильных дорог / С. Ю. Саблин, И. А. Высоцкая, А. В. Скрыпников [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 1 (49). С. 82–85. ISSN 2077–5415.
6. Экспериментальное исследование методов автоматизированного проектирования трассы лесовозной автомобильной дороги / Е. В. Чирков, А. В. Скрыпников, А. О. Боровлев [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 1. С. 29–33. ISSN 0869–4931.

Объем статьи 0,39 авторских листа

## References

1. Litvinov A. S. Controllability and stability of the car [Upravlyayemost' i ustoychivost' avtomobilya]. Moscow : Machinery, 1971. 416 p.
2. The working hypothesis of logging roads rhythmic construction and its mathematical development [Rabochaya gipoteza ritmichnogo stroitel'stva lesovoznykh avtomobil'nykh dorog i ee ekonomiko-matematicheskoe razvitiye] / D. V. Burmistrov, A. V. Skrypnikov, V. G. Kozlov [et al.] // Forestry Bulletin. 2018. Vol. 22. No. 5. Pp. 69–76. ISSN 2542-1468.
3. Vyrko N. P. Construction and operation of timber roads [Stroitel'stvo i eksploatatsiya lesovoznykh dorog] : textbook. Minsk : Belarusian State Technological University, 2005. 446 p.
4. Theoretical foundations of the method of designing a clothoid track with approximation of succession of points / A. V. Skrypnikov, V. G. Kozlov, A. N. Belyaev, E. V. Chernyshova // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 726. Pp. 654–667.
5. Formation of optimal schemes for the staged development of logging roads [Formirovaniye optimal'nykh skhem etapnogo razvitiya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog] / S. Yu. Sablin, I. A. Vysotskaya, A. V. Skrypnikov [et al.] // Systems. Methods. Technologies. 2021. No. 1 (49). Pp. 82–85. ISSN 2077-5415.
6. Experimental study of methods for automated design of the route of a timber-carrying road [Eksperimental'noe issledovanie metodov avtomatizированного проектирования трассы лесовозной автомобильной дороги] / E. V. Chirkov, A. V. Skrypnikov, A. O. Borovlev [et al.] // Automation. Modern Technologies. 2021. Vol. 75. No. 1. Pp. 29-33. ISSN 0869-4931.

УДК 621.314.6

Борис Алексеевич Аржанников, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,  
Александр Петрович Сухогузов, кандидат технических наук, профессор кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,  
Андрей Николаевич Штин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,  
Тимофей Сергеевич Тарасовский, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## ОБОСНОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗА ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ТЯГОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ В НЕПОЛНОФАЗНЫЙ РЕЖИМ

Boris Alexeevich Arzhannikov, DSc in Engineering, Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,  
Alexander Petrovich Sukhoguzov, PhD in Engineering, Professor, Electric Machinery Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,  
Andrey Nikolaevich Shtin, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,  
Timofey Sergeevich Tarasovskiy, Senior Lecturer, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Justification of power decrease of electric locomotive at three-phase system of electric traction when traction rectifier switches to open-phase mode

#### Аннотация

Дано краткое описание используемых на электрифицированных железных дорогах мира систем электрической тяги. Для предлагаемой трехфазной системы электрической тяги рассмотрены особенности работы шестипульсовых мостовых выпрямителей в полнофазном и неполнофазном режимах. Представлены принципиальные схемы и временные диаграммы, поясняющие работу шестипульсовых мостовых выпрямителей в неполнофазном режиме при соединении вентильных обмоток трансформатора «звезда» / «звезда» и «звезда» / «треугольник».

На основании проведенных исследований представлены соотношения, связывающие напряжения, токи и мощности шестипульсовых мостовых выпрямителей в неполнофазном режиме для управляемых и неуправляемых преобразователей.

**Ключевые слова:** тяговое электроснабжение, трехфазная система электрической тяги, шестипульсовые выпрямители, неполнофазный режим, основные соотношения.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-100-106

#### Summary

The paper presents a short description of electric traction systems used on electrified railways in the world. For the proposed three-phase system of electric traction the authors consider features of operation of 6-pulse bridge rectifiers in full-phase and open-phase modes. The paper also demonstrates principal schemes and time diagrams that explain operation of 6-pulse bridge rectifiers in the open-phase mode at connection of valveside windings of a transformer «star» / «star» and «star» / «delta».

On the basis of executed research the authors present relations that connect voltages, currents and power of 6-pulse bridge rectifiers in the open-phase mode for controlled and uncontrolled transformers.

**Keywords:** traction power supply, 3-phase system of electric traction, 6-pulse rectifiers, open-phase mode, main relations.

На электрифицированных железных дорогах мира находятся в эксплуатации системы электрической тяги как постоянного, так и переменного однофазного тока. На участках постоянного тока применяются напряжения 0,6; 0,75; 1,5; 3,0 кВ, на участках переменного — 25 кВ частотой 50 Гц и 15 кВ частотой 162/3 Гц.

При этом проводились и проводятся исследования по усилению и разработке новых систем — повышения напряжения в контактной сети постоянного тока и трехфазной системы электрической тяги.

В частности, в монографии [1] представлена предварительная постановка задачи по разработке трехфазной системы электроснабжения [2]. Как показали исследования, рассмотренные в [1], при использовании на электрифицируемых участках железных дорог трехфазной системы электрической тяги в случае отключения от защиты одной фазы питания (одного из двух проводов контактной сети) возникает необходимость перехода трехфазного оборудования электроподвижного состава, в частности шестипульсовых мостовых выпрямителей, в неполнофазный режим. Особенностью работы указанных преобразователей в этом режиме и посвящена настоящая статья.

Описание процессов, происходящих в шестипульсовых мостовых выпрямителях, будем проводить при следующих допущениях:

1) активные и индуктивные сопротивления питающей сети и преобразовательного трансформатора равны нулю;

2) сопротивления диодов в прямом направлении равны нулю, а в обратном — бесконечности;

3) нагрузкой является противо-ЭДС ( $E_d$ ) и сглаживающий реактор с индуктивным сопротивлением, равным бесконечности ( $X_d = \infty$ ).

Фазы сетевых обмоток обозначены прописными буквами, фазы вентильных — строчными.

Полнофазному режиму работы выпрямителей соответствуют величины без штриха, а неполнофазному — со штрихом.

При изменении напряжения на нагрузке преобразователь может работать по нескольким алгоритмам, будем рассматривать два из них:

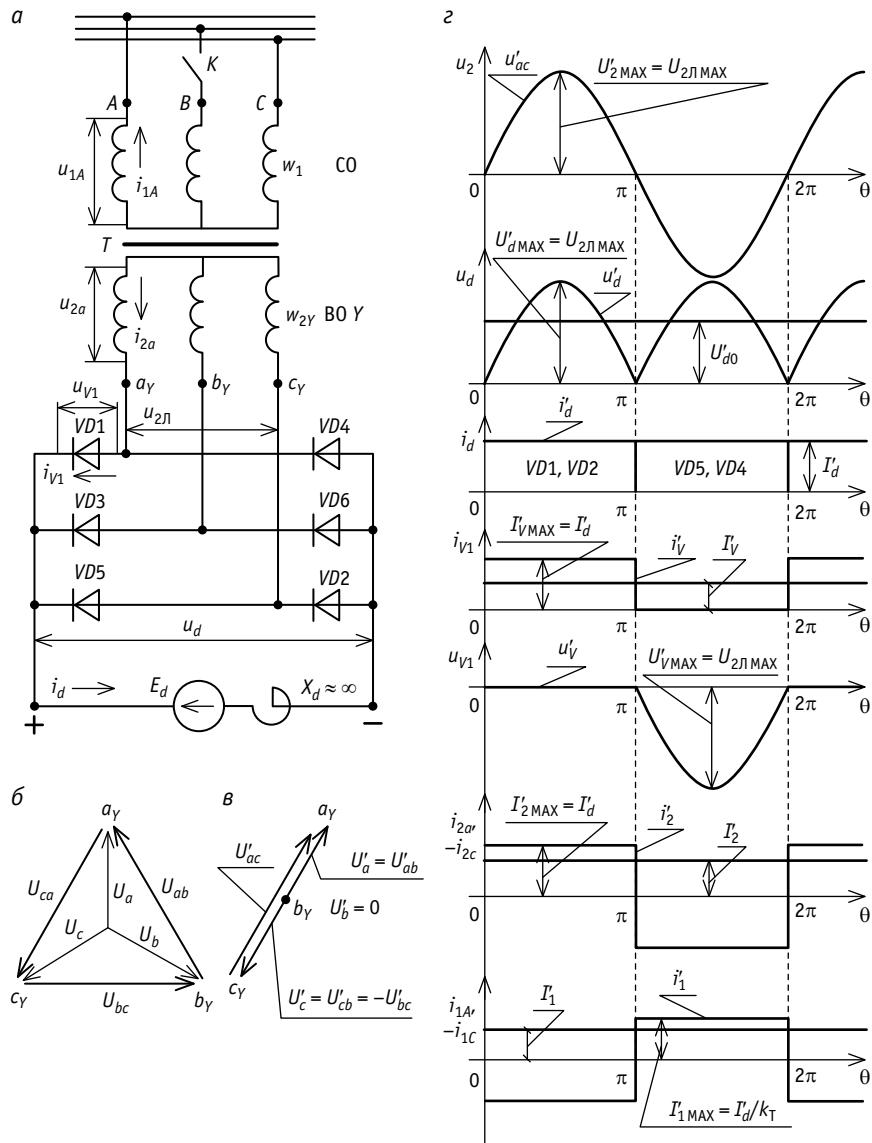


Рис. 1. Принципиальная схема (а), векторные диаграммы напряжений ВО  $Y$  полнофазного (б) и неполнофазного (в) режимов и временные диаграммы неполнофазного режима (г) 6М  $Y/Y$

алгоритм 1 — нагрузка остается постоянной независимо от величины выпрямленного напряжения ( $Z_d = \text{const}$ ), этому алгоритму соответствуют величины с индексом A1;

алгоритм 2 — нагрузка изменяется таким образом, что поступающая на нее мощность остается постоянной ( $P_d = U_d \cdot I_d = \text{const}$ ), этому алгоритму соответствуют величины с индексом A2.

Принципиальные схемы шестипульсовых мостовых выпрямителей при соединении обмоток трансформатора «звезда»/«звезда» (6М  $Y/Y$ ) и «звезда»/«треугольник» (6М  $Y/\Delta$ ) приведены соответственно на рис. 1а и 2а. Каждая из них состоит из преобразовательного трансформатора T, имеющего сетевую (CO) и вентильную (BO) обмотки, соединенные соответственно в «звезду» (BO  $Y$ ) или «треугольник» (BO  $\Delta$ ), и вентильного комплекта, собранного из шести вентильных плеч (VD1—VD6).

При замкнутом ключе K (см. рис. 1а и 2а) схемы работают в полнофазном режиме. Векторные диаграммы фазных и линейных напряжений ВО обеих схем для этого режима изображены соответственно

на рис. 1б и 2б. Выпрямленные напряжения 6М  $Y/Y$  и 6М  $Y/\Delta$  формируются верхушками линейных напряжений ВО трансформатора и имеют шесть пульсаций за период питающей сети [3].

В полнофазном режиме этих преобразователей соотношения между напряжениями, токами и мощностями определяются известными выражениями [4], которые приведены в табл. 1. В этой же таблице даны аналогичные соотношения для двухпульсовой мостовой схемы выпрямления (2М) [4].

Таблица 1

Соотношения, связывающие напряжения, токи и мощности шестипульсовых мостовых выпрямителей в полнофазном режиме при различных схемах соединения ВО

Параметр	6М $Y/Y$	6М $Y/\Delta$	2М
$\frac{U_{2\Delta}}{U_{2\Phi}}$	$\sqrt{3} = 1,732$ (1)	1 (8)	1 (15)
$\frac{U_{d0}}{U_{2\Phi}}$	$\frac{3\sqrt{6}}{\pi} = 2,339$ (2)	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} = 1,35$ (9)	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,9003$ (16)
$\frac{I_V}{I_d}$	$\frac{1}{3} = 0,3333$ (3)	$\frac{1}{3} = 0,3333$ (10)	$\frac{1}{2} = 0,5$ (17)
$\frac{U_{V_{\max}}}{U_{2\Phi}}$	$\sqrt{6} = 2,449$ (4)	$\sqrt{2} = 1,414$ (11)	$\sqrt{2} = 1,414$ (18)
$\frac{I_{2\Phi}}{I_d}$	$\frac{\sqrt{2}}{3} = 0,8165$ (5)	$\frac{\sqrt{2}}{3} = 0,4714$ (12)	1 (19)
$\frac{I_{1\Phi} \cdot k_T}{I_d}$	$\frac{\sqrt{2}}{3} = 0,8165$ (6)	$\frac{\sqrt{2}}{3} = 0,4714$ (13)	1 (20)
$\frac{S_{2H}}{P_{d0}} = \frac{S_{1H}}{P_{d0}}$	$\frac{\pi}{3} = 1,047$ (7)	$\frac{\pi}{3} = 1,047$ (14)	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,111$ (21)

В табл. 1 обозначено:

$U_{2\Delta}$ ,  $U_{2\Phi}$  — действующие значения линейного и фазного напряжений ВО трансформатора, В;

$U_{d0}$  — среднее значение напряжения холостого хода выпрямителя, В;

$I_V$  — среднее значение тока вентильного плача выпрямителя, А;

$I_d$  — среднее значение выпрямленного тока выпрямителя, А;

$U_{V_{\max}}$  — максимальное обратное напряжение вентильного плача выпрямителя, В;

$I_{2\Phi}$ ,  $I_{1\Phi}$  — действующие значения фазных токов ВО и СО трансформатора, А;

$k_T = \frac{w_1}{w_2}$  — коэффициент трансформации трансформатора;

$w_1$ ,  $w_2$  — число витков СО и ВО трансформатора;

$S_{2H}$ ,  $S_{1H}$  — расчетные номинальные мощности ВО и СО трансформатора, ВА;

$S_{2H} = 3 \cdot U_{2H} \cdot I_{2H}$  — расчетная номинальная мощность ВО трансформатора, ВА;

$S_{1H} = 3 \cdot U_{1H} \cdot I_{1H}$  — расчетная номинальная мощность СО трансформатора, ВА;

$P_{d0} = U_{d0} \cdot I_{dH}$  — условная расчетная мощность на выходе выпрямителя, Вт.

Рассмотрим работу 6М  $Y/Y$ , когда ключ  $K$  разомкнут (см. рис. 1а), т.е. разрывается соединение между питающей сетью и фазой  $B$ . В этом случае схема переходит в неполнофазный режим. Напряжения и токи фаз  $B$  и  $b_Y$  равны нулю. В работе участвуют только фазы  $A$ ,  $C$ ,  $a_Y$  и  $c_Y$ .

Векторные диаграммы фазных и линейных напряжений ВО неполнофазного режима 6М  $Y/Y$  изображены на рис. 1в. Из него видно, что напряжения фаз  $a_Y$  и  $c_Y$  ( $U'_a$  и  $U'_c$ ), а также линейные напряжения ( $U'_{ab}$  и  $U'_{bc}$ ) снижаются и по модулю становятся равными друг другу:

$$U'_a = U'_{ab} = -U'_c = -U'_{cb} = \\ = U'_{bc} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_{2\Phi}$$

Однако линейное напряжение  $U'_{ac}$  остается неизменным:

$$U'_{ac} = U'_a - U'_c = U_{ac} = \\ = U_{2\Delta} = \sqrt{3} \cdot U_{2\Phi}. \quad (22)$$

При этом шестипульсовая схема выпрямления превращается в двухпульсовую мостовую схему, в которой в качестве однофазного напряжения ВО действует линейное напряжение полнофазного режима 6М  $Y/Y$  фаз, работающих в неполнофазном режиме. При разрыве соединения в фазе  $B$  это  $U_{ac}$ , при разрыве в фазе  $A$  —  $U_{bc}$ , при разрыве в фазе  $C$  —  $U_{ab}$ .

Рассмотрим временные диаграммы напряжений и токов при работе 6М  $Y/Y$  в неполнофазном режиме (рис. 1г).

Так как разрыв произошел в фазе  $B$ , то в вентильном мосту будет прикладываться только напряжение  $u'_{ac}$ , амплитуда которого равна амплитуде линейного напряжения полнофазного режима (диаграмма  $u_2$  на рис. 1г).

На интервале  $0-\pi$  (рис. 3а) самый высокий потенциал в точке  $a_Y$ , а самый низкий — в точке  $c_Y$ . Ток нагрузки протекает по цепи: точка  $a_Y$ ,  $VD1$ , нагрузка  $Z_d$ ,  $VD2$ , точка  $c_Y$ , фаза  $c_Y$ , фаза  $a_Y$ . К нагрузке прикладывается напряжение  $u'_{ac}$  (диаграмма  $u_d$  на рис. 1г), а в вентильном мосте работают  $VD1$  и  $VD2$  (диаграмма  $i_d$  на рис. 1г).

На интервале  $\pi-2\pi$  (рис. 3б) самый высокий потенциал в точке  $c_Y$ , а самый низкий — в точке  $a_Y$ . Ток нагрузки протекает по цепи: точка  $c_Y$ ,  $VD5$ , нагрузка  $Z_d$ ,  $VD4$ , точка  $a_Y$ , фаза  $a_Y$ , фаза  $c_Y$ . К нагрузке прикладывается напряжение  $u'_{ca}$  (диаграмма  $u_d$  на рис. 1г), а в вентильном мосте работают  $VD5$  и  $VD4$  (диаграмма  $i_d$  на рис. 1г).

Из диаграммы  $u_d$  на рис. 1г следует, что среднее значение выпрямленного напряжения 6М  $Y/Y$  в неполнофазном режиме можно найти как напряжение двухпульсовой мостовой схемы. Поэтому в соответствии с (16), (22), (1) и (2) получим

$$U'_{d0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U'_2 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{2\Delta} = \\ = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_{2\Phi} = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} \cdot \frac{\pi}{3\sqrt{6}} = \frac{2}{3} \cdot U_{d0}. \quad (23)$$

Таким образом, при разрыве цепи в какой-либо фазе СО выпрямленное напряжение 6М  $Y/Y$  снижается в 1,5 раза.

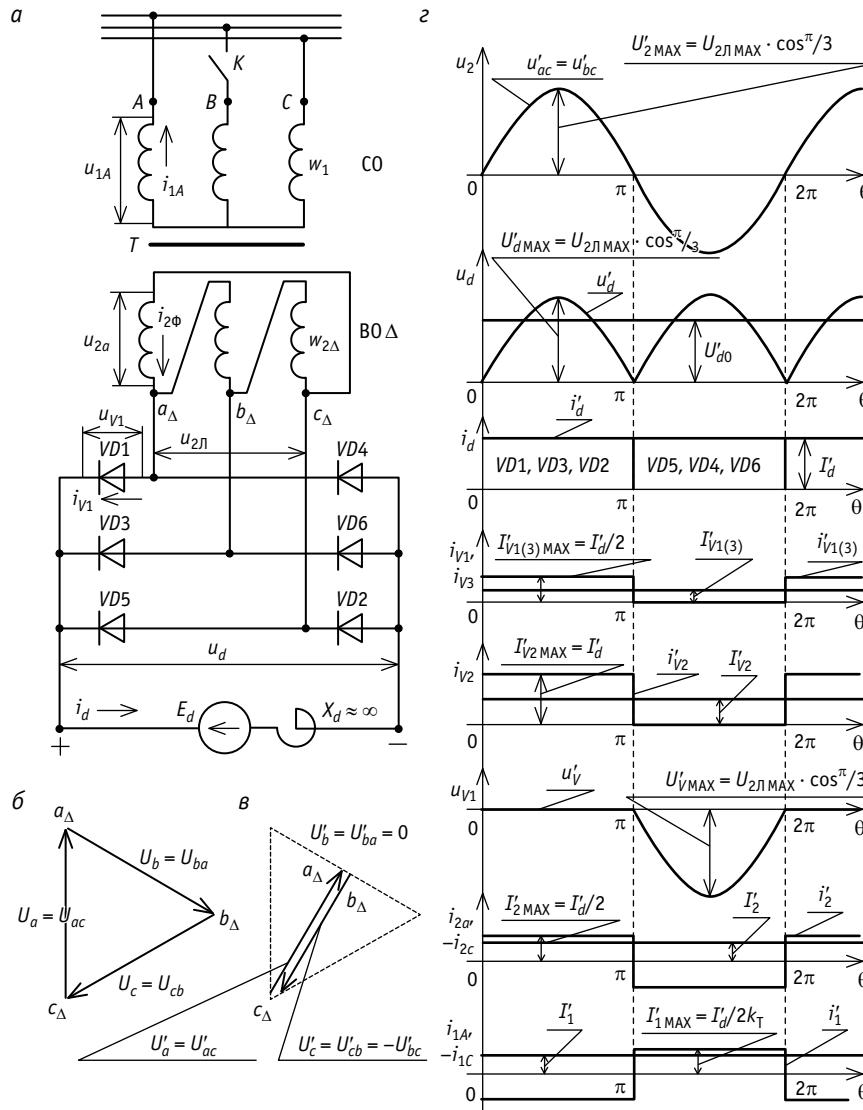


Рис. 2. Принципиальная схема (а), векторные диаграммы напряжений ВО  $\Delta$  полнофазного (б) и неполнофазного (в) режимов и временные диаграммы неполнофазного режима (г) 6М  $Y/\Delta$

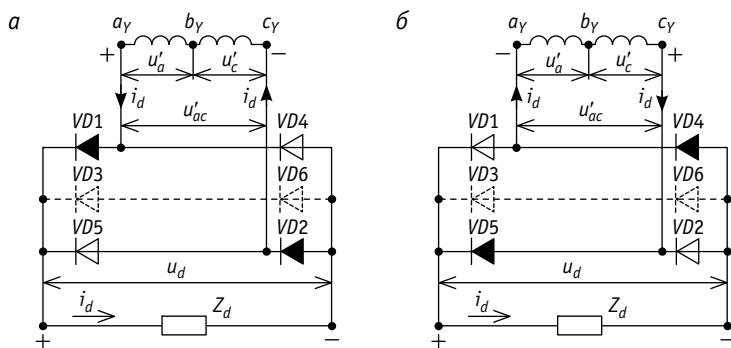


Рис. 3. Мгновенные схемы работы 6М  $Y/Y$  в неполнофазном режиме на интервалах  $0$ – $\pi$  (а) и  $\pi$ – $2\pi$  (б)

Если величина нагрузки не изменяется (алгоритм 1), то и выпрямленный ток уменьшается на эту же величину:

$$I'_{d(A1)} = \frac{2}{3} \cdot I_d. \quad (24)$$

При этом мощность, поступающая к нагрузке, снижается в 2,25 раза:

$$P'_{d(A1)} = U'_{d0} \cdot I'_{d(1)} = \frac{2}{3} \cdot U_{d0} \cdot \frac{2}{3} \cdot I_d = \frac{4}{9} \cdot P_d. \quad (25)$$

Если система автоматического регулирования поддерживает мощность на постоянной нагрузке (алгоритм 2), то выпрямленный ток 6М  $Y/Y$  в неполнофазном режиме должен увеличиться во столько раз, во сколько уменьшилось напряжение, т.е. в 1,5 раза:

$$I'_{d(A2)} = \frac{3}{2} \cdot I_d. \quad (26)$$

При этом мощность, поступающая к нагрузке, остается неизменной:

$$P'_{d(A2)} = P_d. \quad (27)$$

Определим среднее значение тока вентильного плача  $VD1$  (диаграмма  $i_{V1}$  на рис. 1г). На интервале  $0$ – $\pi$  по  $VD1$  протекает ток нагрузки  $i_d$ , а на интервале  $\pi$ – $2\pi$  ток  $VD1$  равен нулю. Исходя из этой диаграммы и с учетом (17) можно записать, что среднее значение тока вентильного плача 6М  $Y/Y$  в неполнофазном режиме равно

$$I'_V = \frac{1}{2} \cdot I'_d. \quad (28)$$

С учетом (28), (24) и (3) для алгоритма 1 и алгоритма 2 получим:

$$I'_{V(A1)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot I_d = \frac{1}{3} \cdot I_d = \frac{1}{3} \cdot 3 \cdot I_V = I_V; \quad (29)$$

$$I'_{V(A2)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot I_d = \frac{3}{4} \cdot I_d = \frac{3}{4} \cdot 3 \cdot I_V = \frac{9}{4} I_V. \quad (30)$$

Найдем максимальное обратное напряжение, которое прикладывается к вентильному плачу  $VD1$  (диаграмма  $u_{V1}$  на

рис. 1 $\sigma$ ). На интервале 0– $\pi$   $VD1$  проводит ток, поэтому  $u_V = 0$ , а на интервале  $\pi$ – $2\pi$  к  $VD1$  через работающий  $VD5$  прикладывается линейное напряжение  $u'_{ac}$ . Исходя из этого и с учетом (18) и (4) можно записать, что максимальное обратное напряжение вентильного плеча 6М  $Y/Y$  в неполнофазном режиме равно

$$U'_{V_{\max}} = \sqrt{2} \cdot U'_2 = \sqrt{2} \cdot U_{2L} = \sqrt{6} \cdot U_{2\Phi} = U_{V_{\max}}. \quad (31)$$

Определим действующее значение тока фазы  $a_Y$  (диаграмма  $i_{2a}$  на рис. 1 $\sigma$ ). На интервале 0– $\pi$  ток по фазе  $a_Y$  протекает (см. рис. 3 $a$ ) справа налево (положительное направление тока) и равен току нагрузки  $i_d$ , а на интервале  $\pi$ – $2\pi$  (см. рис. 3 $b$ ) — слева направо (отрицательное направление тока) и также равен току нагрузки  $i_d$ . Исходя из этого и в соответствии с (19) можно записать, что действующее значение тока фазы  $a_Y$  6М  $Y/Y$  в неполнофазном режиме равно

$$I'_{2\Phi} = I'_d. \quad (32)$$

С учетом (32), (24) и (5) для алгоритма 1 и (32), (26) и (5) для алгоритма 2 получим:

$$I'_{2\Phi(A1)} = \frac{2}{3} \cdot I_d = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{2\Phi} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{2\Phi}; \quad (33)$$

$$I'_{2\Phi(A2)} = \frac{3}{2} \cdot I_d = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{2\Phi} = \frac{3\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \cdot I_{2\Phi}. \quad (34)$$

Проведя аналогичные рассуждения для тока фазы  $A$  CO (диаграмма  $i_{1A}$  на рис. 1 $\sigma$ ) в соответствии с выражениями (20), (24), (26), (6) запишем:

$$I'_{1\Phi(A1)} = \frac{2}{3} \cdot \frac{I_d}{k_T} = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{1\Phi} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{1\Phi}; \quad (35)$$

$$I'_{1\Phi(A2)} = \frac{3}{2} \cdot \frac{I_d}{k_T} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{1\Phi} = \frac{3\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \cdot I_{1\Phi}. \quad (36)$$

Используя выражения (23)–(27) и (33)–(36), найдем расчетные номинальные мощности ВО  $Y$  и  $CO$  при работе 6М  $Y/Y$  в неполнофазном режиме:

$$S'_{2H(A1)} = 3 \cdot U_{2\Phi H} \cdot I'_{2\Phi H(A1)} = 3 \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{6}} \cdot U'_{d0} \cdot I'_{dH(A1)} = \\ = \frac{\pi\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{9} \cdot P_{d0} = \frac{\pi\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} \cdot P_{d0} = \frac{\pi\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{3}{\pi} \cdot S_{2H} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot S_{2H}; \quad (37)$$

$$S'_{2H(A2)} = 3 \cdot U_{2\Phi H} \cdot I'_{2\Phi H(A2)} = \\ = 3 \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{6}} \cdot U'_{d0} \cdot I'_{dH(A2)} = 3 \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{6}} \cdot P'_{d0(A2)} = \\ = \frac{\pi\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \cdot P_{d0} = \frac{\pi\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{3}{\pi} \cdot S_{2H} = \frac{3\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \cdot S_{2H}; \quad (38)$$

$$S'_{1H(A1)} = 3 \cdot U_{1\Phi H} \cdot I'_{1\Phi H(A1)} = \frac{\pi\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} \cdot P_{d0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot S_{1H}; \quad (39)$$

$$S'_{1H(A2)} = 3 \cdot U_{1\Phi H} \cdot I'_{1\Phi H(A2)} = \frac{\pi\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \cdot P_{d0} = \frac{3\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \cdot S_{1H}. \quad (40)$$

Теперь рассмотрим работу 6М  $Y/\Delta$  при разрыве соединения между питающей сетью и фазой  $B$ , т.е. когда ключ  $K$  (см. рис. 2 $a$ ) разомкнут. Схема переходит в неполнофазный режим. Напряжения и токи фаз  $B$  и  $b_\Delta$  равны нулю. В работе участвуют только фазы  $A$ ,  $C$ ,  $a_\Delta$  и  $c_\Delta$ .

Векторные диаграммы фазных и линейных напряжений ВО  $\Delta$  неполнофазного режима 6М  $Y/\Delta$  изображены на рис. 2 $b$ , из которого следует, что напряжения фаз  $a_\Delta$  и  $c_\Delta$  ( $U'_a$  и  $U'_c$ ), а также линейные напряжения ( $U'_{ac}$  и  $U'_{cb}$ ) снижаются в  $\cos \pi/3$  раз и по модулю становятся равными друг другу:

$$U'_a = U'_{ac} = -U'_c = -U'_{cb} = U'_{bc} = U_{2L} \cdot \cos \frac{\pi}{3} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{2\Phi}. \quad (41)$$

Таким образом, при разрыве цепи фазы  $B$  в 6М  $Y/\Delta$  схема выпрямления, так же как и в 6М  $Y/Y$ , превращается в двухпульсовую мостовую схему. В качестве однофазного напряжения ВО действуют два параллельно включенных и равных по величине и направлению фазных ( $U'_a$  и  $U'_c$ ) или линейных ( $U'_{ac}$  и  $U'_{bc}$ ) напряжения тех фаз, которые работают в неполнофазном режиме. При разрыве соединения в фазе  $B$  это  $U'_{ac}$  и  $U'_{bc}$  при разрыве в фазе  $A$  —  $U'_{ab}$  и  $U'_{cb}$ , при разрыве в фазе  $C$  —  $U'_{ac}$  и  $U'_{ab}$ .

Временные диаграммы напряжений и токов при работе 6М  $Y/\Delta$  в неполнофазном режиме представлены на рис. 2 $g$ .

Так как разрыв произошел в фазе  $B$ , то к вентильному мосту будут прикладываться напряжения  $u'_{ac}$  и  $u'_{bc}$ , амплитуды которых в  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  меньше амплитуды линейного напряжения полнофазного режима (диаграмма  $u_2$  на рис. 2 $g$ ).

На интервале 0– $\pi$  (рис. 4 $a$ ) самый высокий потенциал — в точках  $a_\Delta$  и  $b_\Delta$ , а самый низкий — в точке  $c_\Delta$ . Первая половина тока нагрузки выходит из точки  $a_\Delta$ , а вторая — из точки  $b_\Delta$ . Протекая соответственно по  $VD1$  и  $VD3$ , эти токи соединяются в общем катоде вентильного моста и далее по цепи нагрузки и  $VD2$  вновь разветвляются в точке  $c_\Delta$ , проходя по фазам  $a_\Delta$  и  $c_\Delta$ . К нагрузке прикладывается напряжение  $u'_{ac(bc)}$  (диаграмма  $u_d$  на рис. 2 $g$ ), а в вентильном мосте работают  $VD1$ ,  $VD3$  и  $VD2$  (диаграмма  $i_d$  на рис. 2 $g$ ).

На интервале  $\pi$ – $2\pi$  (рис. 4 $b$ ) самый высокий потенциал — в точке  $c_\Delta$ , а самый низкий — в точках  $a_\Delta$  и  $b_\Delta$ . Ток нагрузки протекает по цепи: точка  $c_\Delta$ ,  $VD5$ , нагрузка. Далее ток разветвляется — первая половина течет по цепи  $VD6$ , точка  $b_\Delta$ , фаза  $c_\Delta$ , точка  $c_\Delta$ , а вторая — по цепи  $VD6$ , точка  $b_\Delta$ , фаза  $c_\Delta$ , точка  $c_\Delta$ . К нагрузке прикладывается напряжение  $u'_{ca(cb)}$  (диаграмма  $u_d$  на рис. 2 $g$ ), а в вентильном мосте работают  $VD5$ ,  $VD4$  и  $VD6$  (диаграмма  $i_d$  на рис. 2 $g$ ).

На основании изложенных выше для 6М  $Y/Y$  рассуждений можно получить соотношения между напряжениями, токами и мощностями, подобные выражениям (22)–(40), но для 6М  $Y/\Delta$ . Полученные выражения и результаты расчета их зна-

чений для неполнофазного режима шестипульсовых мостовых выпрямителей при различных схемах соединения ВО приведены в табл. 2.

Анализ табл. 2 показывает, что при разрыве какой-либо фазы СО в шестипульсовых мостовых выпрямителях:

схемы выпрямления переходят в двухпульсовый режим; выпрямленные напряжения снижаются у 6М  $Y/Y$  в 1,5, а у 6М  $Y/\Delta$  в 1,73 раза;

при неизменной нагрузке на выходе выпрямителей ( $Z_d = \text{const}$ ) выходные мощности падают у 6М  $Y/Y$  в 2,25, а у 6М  $Y/\Delta$  в 3 раза, все остальные величины не превышают номинальных значений полнофазного режима;

при неизменной мощности на выходе выпрямителей ( $P_d = U_d \cdot I_d = \text{const}$ ) токи вентильных плеч увеличиваются у 6М  $Y/Y$  в 2,25, а у 6М  $Y/\Delta$  в 2,6 раза; токи и номинальные расчетные мощности ВО и СО увеличиваются 1,84 раза.

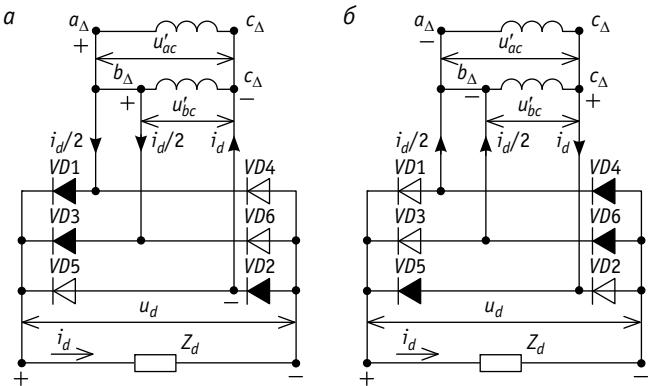


Рис. 4. Мгновенные схемы работы 6М  $Y/\Delta$  в неполнофазном режиме на интервалах 0– $\pi$  (а) и  $\pi$ – $2\pi$  (б)

Таблица 2

Соотношения, связывающие напряжения, токи и мощности шестипульсовых мостовых выпрямителей в неполнофазном режиме при различных схемах соединения ВО

Параметр	6М $Y/Y$		6М $Y/\Delta$	
	Алгоритм работы 1	Алгоритм работы 2	Алгоритм работы 1	Алгоритм работы 2
$\frac{U'_{d0}}{U_{2\Phi}}$	$\frac{2\sqrt{6}}{\pi} = 1,559$			$\frac{\sqrt{6}}{\pi} = 0,7797$
$\frac{U'_{d0}}{U_d}$	$\frac{2}{3} = 0,6667$			$\frac{1}{\sqrt{3}} = 0,5774$
$\frac{I'_d}{I_d}$	$\frac{2}{3} = 0,6667$	$\frac{3}{2} = 1,5$	$\frac{1}{\sqrt{3}} = 0,5774$	$\sqrt{3} = 1,732$
$\frac{P'_d}{P_d}$	$\frac{4}{9} = 0,4444$	1	$\frac{1}{3} = 0,3333$	1
$\frac{I'_V}{I'_d}$			$\frac{1}{2} = 0,5$	
$\frac{I'_V}{I_d}$	$\frac{1}{3} = 0,3333$	$\frac{3}{4} = 0,75$	$\frac{1}{2\sqrt{3}} = 0,2887$	$\frac{\sqrt{3}}{2} = 0,8660$
$\frac{I'_V}{I_V}$	1	$\frac{9}{4} = 2,25$	$\frac{\sqrt{3}}{2} = 0,8660$	$\frac{3\sqrt{3}}{2} = 2,598$
$\frac{U'_{V_{\max}}}{U_{V_{\max}}}$		1		$\frac{\sqrt{3}}{2} = 0,8660$
$\frac{I'_{2\Phi}}{I'_d}$		1		$\frac{1}{2} = 0,5$
$\frac{I'_{2\Phi}}{I_d}$	$\frac{2}{3} = 0,6667$	$\frac{3}{2} = 1,5$	$\frac{1}{2\sqrt{3}} = 0,2887$	$\frac{\sqrt{3}}{2} = 0,8660$
$\frac{I'_{2\Phi}}{I_{2\Phi}} = \frac{I'_{1\Phi}}{I_{1\Phi}}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} = 0,8165$	$\frac{3\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} = 1,837$	$\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} = 0,6123$	$\frac{3\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} = 1,837$
$\frac{S'_{2H}}{P_{d0}} = \frac{S'_{1H}}{P_{d0}}$	$\frac{\pi\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} = 0,855$	$\frac{\pi\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} = 1,924$	$\frac{\pi}{2\sqrt{6}} = 0,6423$	$\frac{\pi\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} = 1,924$
$\frac{S'_{2H}}{S_{2H}} = \frac{S'_{1H}}{S_{1H}}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} = 0,8165$	$\frac{3\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} = 1,837$	$\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} = 0,6123$	$\frac{3\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} = 1,837$

## Литература

1. Аржанников Б. А. Трехфазная система электрической тяги переменного тока : монография. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2019. 142 с.
2. Система тягового электроснабжения железных дорог переменного тока / Б. А. Аржанников : патент 2688194 Российская Федерация. № 2018122747 ; заявл. 21.06.2018 ; опубл. 21.05.2019, Бюл. № 15.
3. Бурков А. Т. Электроника и преобразовательная техника : в 2-х томах. Т. 1. Электроника : учебник. Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. 480 с.
4. Низов А. С., Штин А. Н. Инвертирование электрической энергии на электрифицированных железных дорогах. Ч. 1. Теория работы, характеристики и энергетические показатели зависимых инверторов : учебное пособие. Екатеринбург : УрГАПС, 1998. 88 с.

Объем статьи 0,57 авторских листа

## References

1. Arzhannikov B. A. Three-phase alternating current system of electric traction [Trehfaznaya sistema elektricheskoy tyagi peremennoy toka]. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2019. 142 p.
2. Alternating current railway traction power supply system [Sistema tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennoy toka] / B. A. Arzhannikov : patent 2688194 Russian Federation. No. 2018122747 ; filed 21.06.2018 ; publ. 21.05.2019, Bulletin No. 15.
3. Burkov A. T. Electronics and converter equipment [Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika] : in 2nd volumes. Vol. 1. Electronics : textbook. Moscow : UMTs ZhDT, 2015. 480 p.
4. Nizov A. S., Shtin A. N. Inversion of electric energy on electrified railways. Part 1. Theory of operation, characteristics and energy indicators of dependent inverters [Invertirovaniye elektricheskoy energii na elektrifitsirovannykh zheleznykh dorogakh. Ch. 1. Teoriya raboty, kharakteristiki i energeticheskie pokazateli zavisimykh invertorov] : textbook. Ekaterinburg : UrGAPS, 1998. 88 p.

УДК 621.314.214.332

Наталья Александровна Афанасьева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Ирина Анатольевна Баева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Тимофей Сергеевич Тарасовский, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ БЕСКОНТАКТНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТИРИСТОРНО-РЕАКТОРНЫМ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Natalya Alexandrovna Afanasyeva, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Economics Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Irina Anatolyevna Baeva, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Timofey Sergeevich Tarasovskiy, Senior Lecturer, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### **Economic efficiency of contactless automatic voltage regulation by thyristor-reactor switching device in direct current traction power supply system**

#### **Аннотация**

Проанализированы недостатки эксплуатируемой на электрифицированных железных дорогах постоянного тока системы бесконтактного автоматического регулирования напряжения (БАРН) с реакторным переключающим устройством (РПУ). Определено направление ее совершенствования.

Рассмотрена функциональная схема замкнутой системы БАРН преобразовательного агрегата с тиристорно-реакторным переключающим устройством (ТРПУ) и преобразовательным трансформатором ТРСНП-12500/10. Выполнено технико-экономическое сравнение двух режимов работы системы тягового электроснабжения (СТЭ): без введения устройств регулирования напряжения на тяговых подстанциях с напряжением холостого хода 3500 В и с введением устройств регулирования напряжения системой БАРН при стабилизации напряжения на уровнях 3500, 3600 и 3700 В с различными вариантами переключающих устройств. Определена экономическая эффективность использования системы БАРН с ТРПУ.

**Ключевые слова:** тяговое электроснабжение, тяговая подстанция, преобразовательный агрегат, система бесконтактного автоматического регулирования напряжения, тиристорно-реакторное переключающее устройство, затраты на движение, экономическая эффективность.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-107-113

#### **Summary**

The paper presents results of analysis of disadvantages of contactless automatic voltage regulation (CAVR) system with a reactor switching device (RSD) that is used on direct current electrified railways. It also shows direction of its improvement.

The authors have considered a functional scheme of the closed CAVR system of a converter unit with a thyristor-reactor switching device (TRSD) and a TRSNP-12500/10 converter transformer. They have also carried out an engineering and economical comparison of two modes of traction power supply system (TPSS) operation: without application of voltage regulation devices on traction substations with no-load voltage of 3500 V and with application of voltage regulation devices by the CAVR system at stabilization of voltage on levels of 3500, 3600 and 3700 V with various variants of switching devices. As a result, the authors have determined that the use of the CAVR system with the TRSD is economically efficient.

**Keywords:** traction power supply, traction substation, converter unit, contactless automatic voltage regulation system, thyristor-reactor switching device, costs for movement, economic efficiency.

Правилами технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [1] установлен минимально допустимый уровень напряжения на токоприемнике электровоза — не менее 2,7 и не более 4,0 кВ постоянного тока, а на отдельных участках железнодорожных путей в исключительных случаях — не менее 2,4 кВ [2]. Для поддержания в системе тягового электроснабжения (СТЭ) уровня напряжения в указанных пределах широко применяется система бесконтактного автоматического регулирования напряжения (БАРН) [3], обеспечивающая автоматическую стабилизацию выпрямленного напряжения на шинах тяговых подстанций на заданном уровне.

Система БАРН включает в себя реакторное устройство регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), подключаемое к отводам регулировочной части первичной обмотки преобразовательного трансформатора, и шкаф автоматического управления напряжением «ШАУН 6», который осуществляет подмагничивание и размагничивание управляемых реакторов устройства РПН.

С целью снижения массогабаритных показателей системы БАРН, ее стоимости, а также потерь электроэнергии в устройстве РПН перспективным направлением ее совершенствования является совместное использование в устройстве РПН индуктивного (неуправляемого) реактора и полупроводниковых приборов (тиристоров).

На рис. 1 изображена функциональная схема замкнутой системы БАРН преобразовательного агрегата с тиристорно-реакторным переключающим устройством (БАРН с ТРПУ).

Выходная регулируемая величина системы БАРН с ТРПУ — выпрямленное напряжение преобразовательного агрегата  $U_d$ , значение которого измеряется с помощью датчика напряжения ДН и подается на вход вычислительного устройства В регулятора Р, куда подается также значение заданного уровня стабилизации  $U_{dct-3}$ . Вычислительное устройство В регулятора Р перерабатывает полученную информацию в соответствии с алгоритмом и формирует сигнал управления, который через усилитель Ус подается на тиристорный ключ ТК исполнительного регулируемого устройства ИРУ и обеспечивает ступенчатое бесконтактное изменение выпрямленного напряжения в пределах регулировочной зоны.

Представленная система БАРН с ТРПУ проектируется на базе регулятора Р — шкафа автоматического управления напряжения «ШАУН 6», исполнительного регулируемого тиристорно-реакторного переключающего устройства ТРПУ [4–7], объекта регулирования ОР (преобразовательного агрегата ПА,ключающего в себя преобразовательный трансформатор ПТ и выпрямительный блок ВБ) и датчика напряжения ДН для осуществления обратной связи в системе.

Система обеспечивает бесконтактное регулирование напряжения в диапазоне 14 % при использовании преобразовательного трансформатора ТРСПН-12500/10 [2].

Расчетные внешние характеристики ПА с преобразовательным трансформатором ТРСПН-12500/10 и системой БАРН с ТРПУ показаны на рис. 2.

В системе БАРН с ТРПУ получение внешних стабилизированных характеристик 5–7 происходит путем переключения между естественными внешними характеристиками 1–4. Управле-

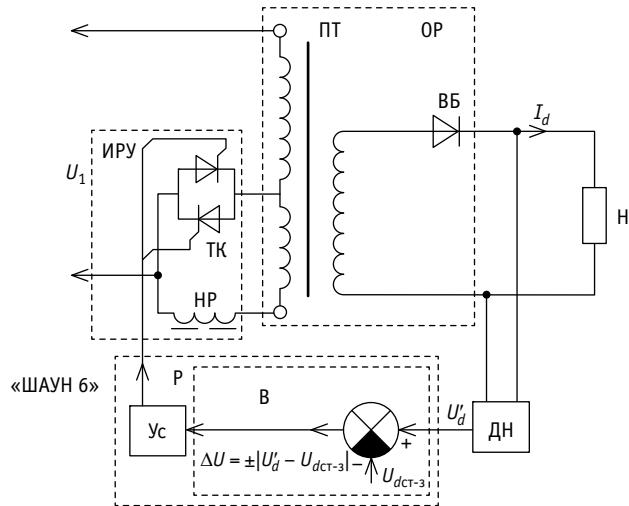


Рис. 1. Функциональная схема замкнутой системы бесконтактного автоматического регулирования напряжения преобразовательного агрегата с тиристорно-реакторным переключающим устройством: ОР — объект регулирования; ПТ — преобразовательный трансформатор; ВБ — выпрямительный блок; Н — нагрузка; ДН — датчик напряжения; Р — регулятор; В — вычислительное устройство; Ус — усилитель; ИРУ — исполнительное регулируемое устройство

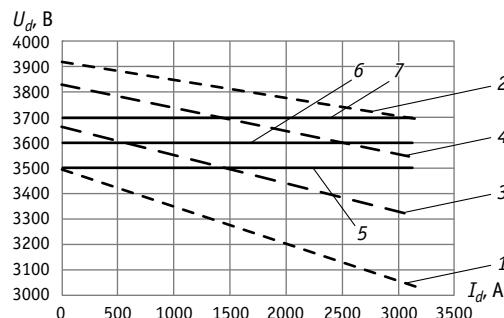


Рис. 2. Расчетные внешние характеристики ПА с преобразовательным трансформатором ТРСПН-12500/10 и системой БАРН с ТРПУ:  
1–4 — естественные, 5–7 — автоматические характеристики

ние тиристорами ТРПУ осуществляется в соответствии с полученным сигналом управления от шкафа «ШАУН 6» по принципу амплитудной модуляции, фиксирующей величину и время отклонения регулировочной величины, при этом возможно реализовать плавное [8] и ступенчатое регулирование выпрямленного напряжения.

Экономическую эффективность системы БАРН с ТРПУ можно определить путем ее сравнения с БАРН с ТРПУ и существующей системой тягового электроснабжения без БАРН, при этом устанавливаются следующие показатели эффективности: чистый дисконтированный доход (ЧДД);

срок окупаемости инвестиций ( $T_{OK}$ ) или период возврата инвестиций.

Определение эффективности основано на соизмерении затрат и результатов в денежном выражении. Оценка предстоящих затрат и результатов осуществляется в пределах расчетного периода, продолжительность которого (горизонт расче-

та) принимается равным 8 годам, при этом расчетный период разбивается на определенное количество шагов. В рассматриваемом случае шаг равен одному году.

Приведение затрат и результатов к начальному моменту времени осуществляется умножением их на коэффициент дисконтирования:

$$\alpha_t = \frac{1}{(1+E)^t}, \quad (1)$$

где  $E$  — норма дисконта,  $E = 5,5\%$ ;

$t$  — номер шага.

Чистый дисконтированный доход определяется по формуле

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (P_t - Z_t) \cdot \alpha_t, \quad (2)$$

где  $P_t$  — приток денег в году  $t$  (стоимостная оценка результатов), тыс. руб.;

$Z_t$  — отток денег в году  $t$ , тыс. руб.;

$T$  — расчетный период, лет.

На практике используют метод приблизительной оценки срока окупаемости:

$$T_{\text{ОК}} = t_{-} - \frac{\text{ЧДД}_{-}}{\text{ЧДД}_{+} - \text{ЧДД}_{-}}, \quad (3)$$

где  $t_{-}$  — последний период реализации проекта, при котором разность накопленного дисконтированного дохода и дисконтированных затрат принимает отрицательное значение, лет;

$\text{ЧДД}_{-}$  — последнее отрицательное значение ЧДД, тыс. руб.;

$\text{ЧДД}_{+}$  — первое положительное значение ЧДД, тыс. руб.

При расчете ЧДД необходимо определить капитальные затраты на внедрение систем БАРН с РПУ и БАРН с ТРПУ.

Сравниваемые варианты отличаются друг от друга типом используемого оборудования в РУ-10 кВ.

Капитальные затраты на сооружение РУ-10 кВ включают в себя стоимость основного силового электротехнического оборудования ( $K_{\text{ЭО}}$ ), стоимость фундаментов, опорных и поддерживающих конструкций, проводов, изоляторов и т.д. ( $K_{\text{ФК}}$ ) и стоимость строительных и монтажных работ ( $K_{\text{СМР}}$ ), тыс. руб.:

$$K_0 = K_{\text{ЭО}} + K_{\text{ФК}} + K_{\text{СМР}}. \quad (4)$$

При расчете стоимости оборудования рассматриваемых вариантов РУ-10 кВ необходимо учитывать следующее.

1. Оборудование всех РУ тяговой подстанции, за исключением участка присоединения преобразовательного трансформатора в РУ-10 кВ, одинаковое для всех вариантов и не учитывается расчетах.

2. Укрупненный расчет стоимости системы БАРН с ТРПУ состоит из стоимости тиристоров (в расчетах принимаются тиристоры ПАО «Электровыпрямитель», г. Саранск), неуправляемого реактора и стоимости конструктива, включая корпус, радиаторы, систему управления и т.д. (табл. 1).

3. Стоимость строительных работ и монтажа преобразовательных трансформаторов совпадает для всех рассматриваемых вариантов расчета, поэтому ими пренебрегаем. Стоимость монтажа устройств РПН включена в стоимость оборудования.

4. Стоимость фундаментов, опорных и поддерживающих конструкций при сооружении преобразовательных трансформаторов совпадает для рассматриваемых вариантов расчета, поэтому ими пренебрегаем. Размеры устройства РПН системы БАРН с РПУ отличаются от размеров преобразовательного трансформатора незначительно, соответственно стоимость фундаментов, опорных и поддерживающих конструкций принимается одинаковой и равной 500 тыс. руб. В связи с тем что система БАРН с ТРПУ еще не изготавливается и является новым устройством, выполнить расчет стоимости фундаментов, опорных и поддерживающих конструкций с достаточной точностью на этапе проектирования невозможно из-за отсутствия многих необходимых данных. Поскольку приблизительная занимаемая площадь ТРПУ в два раза меньше занимаемой площади устройства РПН системы БАРН, стоимость принимается равной 250 тыс. руб.

5. Стоимость основного силового оборудования участка присоединения преобразовательного трансформатора в РУ-10 кВ приведена в табл. 2.

Эксплуатационные затраты при обслуживании преобразовательного трансформатора и устройств РПН включают в себя затраты на заработную плату обслуживающего персонала, отчисления на социальные нужды, расходы на электроэнергию, амортизационные отчисления.

Затраты на обслуживание оборудования, состоящие из затрат на заработную плату обслуживающего персонала и отчисления на социальные нужды, одинаковые для рассматриваемых вариантов, поэтому ими пренебрегаем.

При проведении электрических расчетов СТЭ применялся программный комплекс КОРТЭС. Электрические расчеты проводились на участке Шаля — Кунгур Свердловской железной дороги (рис. 3) при движении в нечетном направлении пакета грузовых поездов массой 6300 т — 9000 т — 6300 т с межпоездным интервалом 8 мин и движением в четном направлении грузовых поездов массой 2700 т с межпоездным интервалом 8 мин. Скорость движения грузовых поездов 50 км/ч. На рис. 3 представлен продольный профиль участка с эксплуатируемым силовым оборудованием.

Таблица 1

Укрупненный расчет стоимости системы БАРН с ТРПУ

Оборудование	Количество	Цена за единицу, тыс. руб.	Общая стоимость, тыс. руб.
Тиристорный ключ БК8Т-680-5,4-П	3	296*	888
Неуправляемый реактор	1	7000**	7000
Конструктив (корпус, радиаторы, система управления и т.д.)	—	—	888***
Итого			8776

\*Цена на тиристоры взята из прайс-листа ПАО «Электровыпрямитель».

\*\*Цена на неуправляемый реактор взята из прайс-листа АО «УЭТМ».

\*\*\*Стоимость конструктива принята равной стоимости тиристоров.

Таблица 2

Стоимость основного силового оборудования участка присоединения преобразовательного трансформатора в РУ-10 кВ

Тип переключающего устройства в системе БАРН	Оборудование	Количество	Цена за единицу, тыс. руб.	Стоимость, тыс. руб.
—	Трансформатор ТРДП-16000/10	2	35000	70000
Итого				70000
РПУ	Трансформатор ТРДП-16000/10	2	35000	70000
	Реактор РТДП-6300/10	2	23000	46000
Итого				116000
ТРПУ	Трансформатор ТРСНП-12500/10	2	30000	60000
	Тиристорно-реакторное переключающее устройство	2	8776	17552
Итого				77552

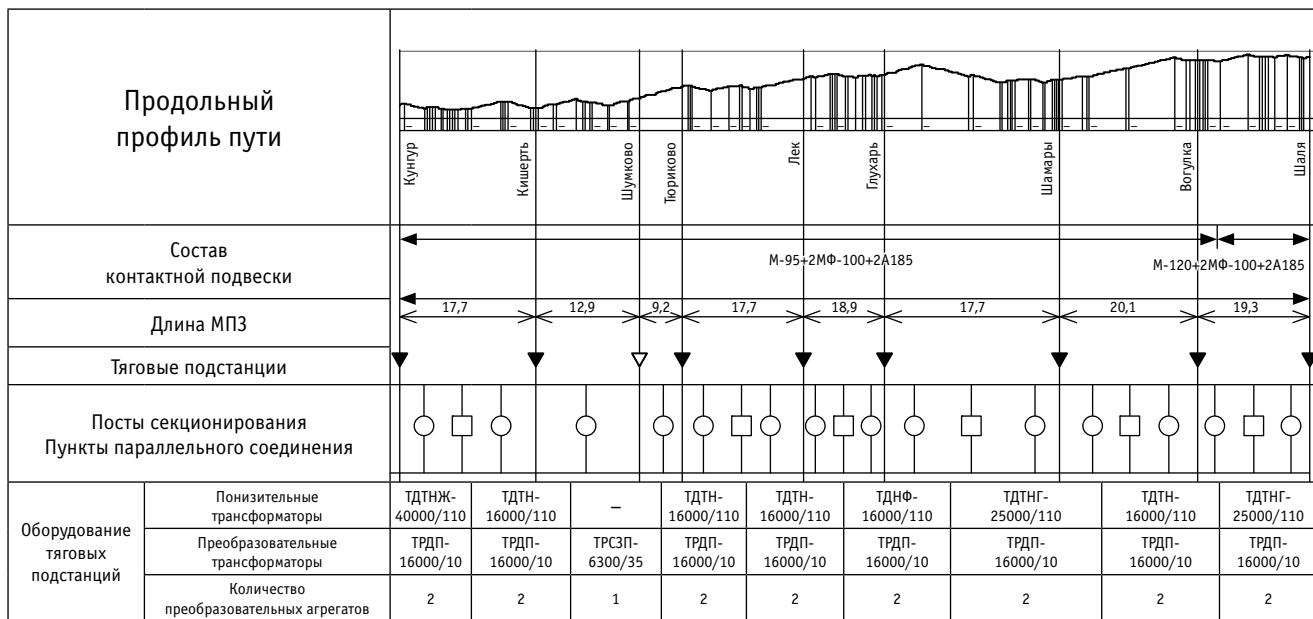


Рис. 3. Схема участка Шала — Кунгур

Таблица 3

Общие параметры преобразовательных трансформаторов с устройством РПН

Тип регулируемого преобразовательного трансформатора и регулятора	Номинальная мощность сетевой обмотки, кВА	Номинальное напряжение, кВ	Напряжение короткого замыкания, %	Потери, кВт		Ток холостого хода, %
				холостого хода	короткого замыкания	
ТРДП-16000/10 с РТДП-6300/10	13430	10,5	11,55	33	109	5
ТРСНП-12500/10 с ТРПУ	12530	10,5	8,13	30	69	4,5

Электрические расчеты выполнялись для следующих режимов работы.

1. Существующая система тягового электроснабжения без применения системы БАРН с напряжением холостого хода  $U_{dxx} = 3500$  В.

2. Система тягового электроснабжения с применением системы БАРН с РПУ при стабилизации напряжения на уровне 3500, 3600 и 3700 В.

3. Система тягового электроснабжения с применением системы БАРН с ТРПУ при стабилизации напряжения на уровне 3500, 3600 и 3700 В.

Общие параметры преобразовательных трансформаторов с устройством РПН приведены в табл. 3.

Экономический эффект  $\Delta\mathcal{E}$  при сравнении вариантов расчета получается за счет уменьшения расхода электрической энергии ( $\mathcal{E}\mathcal{E}$ ) тяговых подстанций с учетом расхода  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  по счетчикам электроподвижного состава, потерь  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  в тяговой сети и трансформаторах тяговых подстанций (табл. 4), а при сравнении системы БАРН с ТРПУ и БАРН с РПУ — за счет снижения потерь  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  в трансформаторах тяговых подстанций с учетом потерь в регулирующем устройстве РПН (табл. 5).

Годовой экономический эффект от снижения расхода электрической энергии тяговых подстанций можно определить по формуле

$$\Delta\mathcal{E} = \Delta A \cdot \Pi_{\mathcal{E}} \cdot 2 \cdot 365, \quad (5)$$

где  $\Delta A$  — снижение расхода электрической энергии за 12 ч, кВт·ч;  $\Pi_{\mathcal{E}}$  — цена 1 кВт·ч электрической энергии, равная 3,91 руб.;

2 — коэффициент для перевода к суточной норме часов.

Из табл. 4 видно, что годовой экономический эффект СТЭ с введением устройств регулирования напряжения системой БАРН с РПУ на уровне стабилизации 3500, 3600 и 3700 В по сравнению с СТЭ без введения устройств регулирования напряжения с  $U_{dxx} = 3500$  В составляет от 23670 до 72276 тыс. руб. в зависимости от заданного уровня стабилизации напряжения. В СТЭ с введением устройств регулирования напряжения системой БАРН с ТРПУ относительно СТЭ без введения устройств регулирования напряжения экономический эффект составляет от 28177 до 72539 тыс. руб. в зависимости от заданного уровня стабилизации напряжения.

Таблица 4

Годовой экономический эффект от уменьшения расхода электрической энергии тяговых подстанций

Режим работы СТЭ	Напряжение тяговой подстанции, кВ	Расход $\mathcal{E}\mathcal{E}$ тяговой подстанции, кВт·ч	Снижение расхода $\mathcal{E}\mathcal{E}$ тяговых подстанций, кВт·ч	Экономический эффект, тыс. руб.
Без введения устройств регулирования напряжения	3,5 хх	1051282	—	—
С введением устройств регулирования напряжения системой БАРН с РПУ	3,5 ст	1042989	8293 (0,78 %)	23670
	3,6 ст	1036031	15251 (1,45 %)	43531
	3,7 ст	1026006	25276 (2,4 %)	72276
С введением устройств регулирования напряжения системой БАРН с ТРПУ	3,5 ст	1041410	9872 (0,94 %)	28177
	3,6 ст	1035246	16036 (1,52 %)	45771
	3,7 ст	1025868	25414 (2,42 %)	72539

Таблица 5

Годовой экономический эффект при сравнении БАРН с ТРПУ и БАРН с РПУ

Режим работы СТЭ	Напряжение ТП, кВ	Потери $\mathcal{E}\mathcal{E}$ в трансформаторах с учетом потерь в регулирующем устройстве БАРН, кВт·ч	Снижение потерь $\mathcal{E}\mathcal{E}$ в трансформаторах с учетом потерь в регулирующем устройстве БАРН, кВт·ч	Экономический эффект, тыс. руб.
С введением устройств регулирования напряжения системой БАРН с РПУ	3,5 ст	22463	—	—
	3,6 ст	21907	—	—
	3,7 ст	21246	—	—
С введением устройств регулирования напряжения системой БАРН с ТРПУ	3,5 ст	20264	2199	6276
	3,6 ст	19821	2086	5954
	3,7 ст	19277	1969	5620

Таблица 6

Расчет показателей экономической эффективности, млн руб.

Показатели экономической эффективности	Значение показателя по годам $t$ расчетного периода									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Итого
Операционная деятельность										
Приток денежных средств										
Снижение текущих затрат	–	45,771	45,771	45,771	45,771	45,771	45,771	45,771	45,771	366,168
Амортизационные отчисления	–	5,212	5,212	5,212	5,212	5,212	5,212	5,212	5,212	41,696
Приток, всего	–	50,983	50,983	50,983	50,983	50,983	50,983	50,983	50,983	407,864
Отток денежных средств										
Налог на имущество	–	1,654	1,596	1,539	1,482	1,424	1,367	1,310	1,252	11,628
Налог на прибыль	–	7,780	7,792	7,803	7,815	7,826	7,838	7,849	7,861	62,567
Инвестиционная деятельность										
Отток денежных средств										
Затраты на внедрение новой техники	77,802	–	–	–	–	–	–	–	–	77,802
Отток, всего	77,802	9,434	9,388	9,342	9,297	9,25	9,205	9,159	9,113	151,997
Денежный поток										
ЧДД	–77,802	39,382	37,37	35,461	33,649	31,93	30,299	28,751	27,282	186,322
То же нарастающим итогом	–77,802	–38,419	–1,048	34,412	68,062	99,993	130,292	159,043	186,322	–

Из табл. 5 видно, что годовой экономический эффект от снижения потерь электрической энергии в трансформаторах тяговых подстанций с учетом потерь в регулирующем устройстве в системе БАРН с ТРПУ по сравнению с системой БАРН с РПУ составляет от 5620 до 6276 тыс. руб. в зависимости от заданного уровня стабилизации напряжения.

Для дальнейших расчетов экономической эффективности системы БАРН с ТРПУ в соответствии с формулами (2), (3) принимаются результаты расчета годового экономического эффекта из табл. 4 для следующих режимов работы СТЭ: без введения устройств регулирования напряжения на тяговых подстанциях с  $U_{dxx} = 3500$  В и с введением устройств регулирования системой БАРН с ТРПУ при заданном уровне стабилизации напряжения  $U_{dct-3} = 3600$  В. Расчет показателей экономической эффективности выполнен в соответствии с [9], результаты приведены в табл. 6.

На рис. 4 представлен график окупаемости внедрения системы БАРН с ТРПУ.

Результаты выполненных расчетов позволяют сделать следующие выводы:

1) годовой экономический эффект СТЭ с системой БАРН с ТРПУ относительно СТЭ без введения устройств регулирования напряжения системой БАРН составит от 28177 до 72539 тыс. руб. в зависимости от заданного уровня стабилизации;

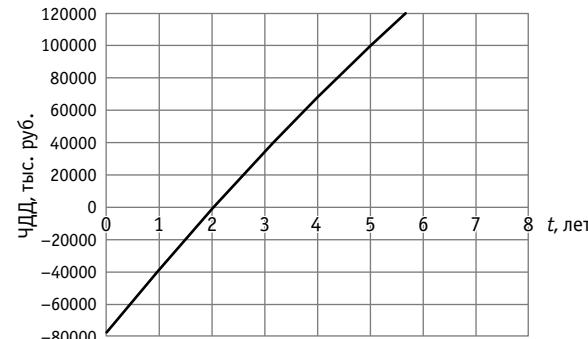


Рис. 4. График окупаемости внедрения системы БАРН с ТРПУ

2) годовой экономический эффект СТЭ с системой БАРН с ТРПУ относительно СТЭ с системой БАРН с РПУ составит от 5620 до 6276 тыс. руб. в зависимости от заданного уровня стабилизации;

3) внедрение системы БАРН с ТРПУ является эффективным по всем показателям, чистый дисконтированный доход за период 8 лет — 186,322 тыс. руб.;

4) расчетный срок окупаемости составляет 2,02 года, следовательно, применение системы БАРН с ТРПУ можно считать экономически эффективным.

## Литература

1. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Екатеринбург : УралЮрИздат, 2013. 239 с.
2. Совершенствование основных требований к системе и устройствам тягового электроснабжения постоянного тока / Б. А. Аржанников, М. П. Бадер, А. Т. Бурков [и др.] // Электротехника. 2016. № 9. С. 51–57. ISSN 0013-5860.
3. Аржанников Б. А., Набойченко И. О. Усиление системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ при пропуске тяжеловесных поездов // Транспорт Урала. 2015. № 2 (45). С. 13–17. ISSN 1815–9400.
4. Аржанников Б. А. Устройства регулирования напряжения преобразовательных трансформаторов под нагрузкой : учебное пособие. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2017. 101 с.
5. Тарасовский Т. С. Тиристорно-реакторное устройство регулирования напряжения под нагрузкой РПН преобразовательного трансформатора ТРСЗП-12500/10 ЖУ1 // Транспорт Урала. 2017. № 3 (54). С. 87–91. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-87-91. ISSN 1815–9400.
6. Способ переключения ответвлений обмотки трансформатора / И. А. Зборовский : патент 2086073 Российская Федерация. № 95112939/07 ; заявл. 25.07.1995 ; опубл. 27.07.1997, Бюл. № 21.
7. Способ переключения ответвлений обмотки трансформатора и устройство для его осуществления / Б. А. Аржанников, Л. А. Фролов, А. Н. Штин : патент 2274945 Российская Федерация. № 2004127292/09 ; заявл. 13.09.2004 ; опубл. 20.04.2006, Бюл. № 11.
8. Тарасовский Т. С., Лимберг А. О. Система бесконтактного автоматического регулирования напряжения БАРН с тиристорно-реакторным переключающим устройством // Инновационный транспорт. 2021. № 2 (40). С. 49–53. DOI:10.20291/2311-164X-2021-2-49-53. ISSN 2311–164X.
9. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте. Москва : МПС РФ, 1998.

## References

1. The Russian Federation railway operating rules [Pravila tekhnicheskoy eksploatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii]. Ekaterinburg : Ural-Yurizdat, 2013. 239 p.
2. Improvement of main requirements to direct current traction power supply system and its facilities [Sovershenstvovanie osnovnykh trebovaniy k sisteme i ustroystvam tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka] / B. A. Arzhannikov, M. P. Bader, A. T. Burkov [et al.] // Russian Electrical Engineering. 2016. No. 9. Pp. 51–57. ISSN 0013-5860.
3. Arzhannikov B. A., Naboychenko I. O. 3,0 kV DC traction power supply system amplification for heavy train traffic [Usilenie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka 3,0 kV pri propuske tyazhelovesnykh poezdov] // Transport of the Urals. 2015. No. 2 (45). Pp. 13–17. ISSN 1815–9400.
4. Arzhannikov B. A. Devices for regulating the voltage of transforming transformers under load [Ustroystva regulirovaniya napryazheniya preobrazovatel'nykh transformatorov pod nagruzkoy] : textbook. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2017. 101 p.
5. Tarasovskiy T. S. Thyristor-reactor voltage regulation device under load of RPN converter transformer TRSZP-12500/10 ZhU1 [Tiristorno-reaktornoe ustroystvo regulirovaniya napryazheniya pod nagruzkoy RPN preobrazovatel'nogo transformatora TRSZP-12500/10 ZhU1] // Transport of the Urals. 2017. No. 3 (54). Pp. 87–91. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-87-91. ISSN 1815–9400.
6. Method of switching of winding taps of a transformer [Sposob pereklyucheniya otvetyleniy obmotki transformatora] / I. A. Zborovskiy : patent 2086073 Russian Federation. No. 95112939/07 ; filed 25.07.1995 ; publ. 27.07.1997, Bulletin No. 21.
7. Method of switching of winding taps of a transformer and a device for its realization [Sposob pereklyucheniya otvetyleniy obmotki transformatora i ustroystvo dlya ego osushhestvleniya] / B. A. Arzhannikov, L. A. Frолов, A. N. Shtin : patent 2274945 Russian Federation. No. 2004127292/09 ; filed 13.09.2004 ; publ. 20.04.2006, Bulletin No. 11.
8. Tarasovskiy T. S., Limberg A. O. System of contactless automatic voltage regulation of BARN with thyristor-reactor switching device [Sistema beskontaktnogo avtomaticheskogo regulirovaniya napryazheniya BARN s tiristorno-reaktornym pereklyuchayushchim ustroystvom] // Innotrans. 2021. No. 2 (40). Pp. 49–53. DOI:10.20291/2311-164X-2021-2-49-53. ISSN 2311–164X.
9. Guidelines on assessment of investment projects on railway transport [Mетодические рекомендации по оценке инвестиционных проектов на земледелии и транспорте]. Moscow : Ministry of Transport of the Russian Federation, 1998.

Объем статьи 0,69 авторских листа

УДК 621.314.21:665.6

Светлана Игоревна Макашева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения»  
Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия,

Павел Сергеевич Пинчуков, кандидат технических наук, директор Электроэнергетического института,  
доцент кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета  
путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ «ХРОМАТИК» ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ТЯГОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Svetlana Igorevna Makasheva, PhD in Engineering, Associate Professor, Power Supply Systems Department,  
Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia,

Pavel Sergeevich Pinchukov, PhD in Engineering, Director of Electric Power Institute, Associate Professor,  
Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia

### Development of «CHROMATIC» program for assessment of condition of traction transformers

#### Аннотация

Статья посвящена актуальной проблеме предотвращения отказов маслонаполненного оборудования железных дорог при помощи неразрушающих методов диагностики и раннего выявления предотказных состояний. Предложена зарегистрированная программа для ЭВМ, позволяющая оценивать и прогнозировать состояние силовых трансформаторов тяговых подстанций на основании хроматографического анализа растворенных газов.

В качестве объектов исследования выбраны тяговые трансформаторы Хабаровской дистанции электроснабжения Дальневосточной железной дороги, на примере которых выполнен анализ концентраций растворенных газов за восемилетний период наблюдений. Задача прогноза состояния масляной изоляции решена применением нормального закона распределения. Разработанная программа может быть использована в блоке прогнозной аналитики цифровых тяговых подстанций, что отвечает современным направлениям построения цифровой железной дороги.

**Ключевые слова:** неразрушающие методы диагностики, хроматографический анализ растворенных газов (ХАРГ), силовой трансформатор, цифровая тяговая подстанция, программное обеспечение, мониторинг, прогнозная аналитика.

#### Summary

The paper deals with the urgent problem of preventing failures of oil-filled railways equipment by means of non-destructive methods of diagnostics and early detection of pre-failure conditions. A computer program based on dissolved gas analysis for assessing and predicting the power transformer's state was proposed and registered.

The objects of the study are traction substation's transformers located on the Far Eastern Railway of Russia. The dissolved gases concentration has been analyzed for an eight-year observation period. The problem of the state of oil insulation predicting is solved by Gaussian distribution applying. The developed software can be used at the digital traction substations as the predictive analytic block, which corresponds to the current digitalization trend.

**Keywords:** non-destructive diagnostic methods, dissolved gas analysis, power transformer, digital traction substation, software, monitoring, predictive analytics.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-114-119

#### ВВЕДЕНИЕ

В мировой энергетике широко используются силовые трансформаторы, срок эксплуатации которых зачастую превышает паспортные 25 лет, установленные заводом-изготовителем. Срок эксплуатации силовых трансформаторов определяется состоянием системы его изоляции, поэтому обнаружение неисправностей изоляции при помощи неразрушающих методов диагностики помогает предотвратить отказы и выявить нарушения в работе трансформатора на ранней стадии их формирования. Это объясняет наблюдаемый в настоящее время повышенный интерес к проведению неразрушающего контроля и технической диагностики различного оборудования в отечественной и мировой энергетике [1–3], не исключением стали и объекты электроснабжения компании ОАО «РЖД». Неразрушающий контроль и техническая диагностика, реализуемые при помощи современных методов и оборудования, отвечают сразу нескольким ключевым направлениям развития железнодорожного транспорта: совершенствованию принципов бережливого производства, развитию цифровой инфраструктуры, повышению эффективности использования всех видов ресурсов и оборудования, что особенно важно в условиях возросшей интенсивности железнодорожных перевозок [4–6].

Один из наиболее качественных, точных и безвредных методов диагностики состояния силового трансформатора — метод хроматографического анализа газов, растворенных в трансформаторном масле (ХАРГ), который заключается в изъятии из бака трансформатора небольшого количества трансформаторного масла для пробы.

Впервые в истории метод хроматографии был предложен и применен русским ученым М. С. Цветом в 1900 г., а с конца 1960-х гг. начал широко использоваться для анализа состава газов, растворенных в минеральном масле изоляции си-

ловых трансформаторов [1, 2]. ХАРГ стал стандартом в энергетической промышленности во всем мире и считается наиболее важным методом испытания масла для оценки состояния изоляции жидкостей в электрических приборах. Масло подвергается анализу на специальном оборудовании — хроматографе, в результате чего оно разделяется на жидкость и составляющие его газы [1, 2]. Важно, что пробу масла можно взять с большей части маслонаполненного оборудования, не выводя его из эксплуатации, в любое время, и это дает возможность своевременно выявлять и устранять возможные проблемы.

В настоящее время на сети российских железных дорог ХАРГ проводится с помощью хроматографов от компании «Хроматэк» [7]. Согласно данным Дорожной электротехнической лаборатории (ДЭЛ), на Дальневосточной железной дороге (ДВЖД) до 2020 г. использовались хроматографы серии «Кристалл 2000М», а в 2021 г. на смену им приходят приборы марки «Хроматэк-Кристалл 5000». Концентрация газов, содержащихся в трансформаторном масле, их граничные соотношения, скорость нарастания, периодичность и процедура проведения ХАРГ регламентируются нормативными документами, которые применимы как для энергетики в целом [1, 2, 8], так и для железнодорожного транспорта в частности [1, 2, 8, 9].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В аппаратно-программном комплексе, поставляемом вместе с указанными выше марками хроматографов, имеется аналитический блок «Хроматэк Энергетик», предназначенный для диагностики развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по составу газов, растворенных в масле [7]. Однако граничные параметры концентраций и соотношений газов, используемые для оценки состояния силового трансформатора, задаются в соответствии с нормативными документами, применяемыми в энергетике в целом [10], но не учитывают требований, дополнительно указанных в железнодорожных отраслевых нормативах [8, 9]. В результате использования аналитического блока «Хроматэк Энергетик» для анализа состо-

яния тяговых трансформаторов является неправомочным, и поэтому сотрудникам ДЭЛ ДВЖД приходится вручную заносить информацию в самостоятельно разработанные таблицы, что увеличивает затраты времени на обработку и хранение данных и создает потенциальный риск ошибки из-за человеческого фактора.

Цель представленного в статье исследования заключалась в повышении эффективности производства ХАРГ для тяговых трансформаторов путем создания удобного программного обеспечения (ПО). Необходимо, чтобы разрабатываемое ПО содержало два блока обработки результатов ХАРГ:

1) оценка состояния силового трансформатора (постановка диагноза) на основании граничных условий, регламентированных действующими отраслевыми железнодорожными документами;

2) прогнозирование состояния анализируемых параметров с высокой точностью и скоростью.

Объекты исследования — силовые тяговые трансформаторы железных дорог России, предмет исследования — состояние их изоляции.

## АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ДЛЯ ВЫБОРА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Основные газы, растворенные в масле, по которым проводится анализ отклонений от регламентированных норм согласно [8–10], — это водород ( $H_2$ ), метан

( $CH_4$ ), ацетилен ( $C_2H_2$ ), этилен ( $C_2H_4$ ), этан ( $C_2H_6$ ), оксид углерода ( $CO$ ), диоксид углерода ( $CO_2$ ). Существующая система оценки состояния тягового трансформатора при газохроматографическом контроле по [9] предусматривает постановку диагноза исходя из трех этапов проверки:

1) сопоставление измеренных данных концентрации газов в масле с граничными значениями;

2) сопоставление отношения концентраций отдельных видов газов с установленными значениями этих же отношений;

3) сопоставление по относительной скорости роста концентрации газов в масле.

После литературного анализа требований, предъявляемых к ХАРГ силовых трансформаторов [8–10], была составлена табл. 1, в которой систематизирована информация о видах возможных дефектов тягового трансформатора и их характеристиках.

Согласно табл. 1, с помощью ХАРГ можно контролировать развитие следующих дефектов тяговых трансформаторов по количественному показателю концентрации каждого из газов: электрических, возникающих вследствие электрических разрядов в трансформаторном масле, и термических (перегрев токоведущих частей и их соединений). Нормируемые граничные значения концентрации каждого из газов в зависимости от марки и строения трансформатора, а также его срока эксплуатации различаются.

Таблица 1

### Виды дефектов трансформатора и их характеристики

№ п/п	Дефект	Выделяемый газ	Проявление дефекта
1	Электрический	Водород ( $H_2$ )	Частичные разряды, искровые и дуговые разряды
		Ацетилен ( $C_2H_2$ )	Электрическая дуга, искрение
2	Термический	Метан ( $CH_4$ )	Нагрев масла и бумажно-масляной изоляции в диапазоне температур 400–600 °C или нагрев, сопровождающийся разрядами
		Этан ( $C_2H_6$ )	Нагрев масла и бумажно-масляной изоляции в диапазоне температур 300–400 °C
		Этилен ( $C_2H_4$ )	Нагрев масла и бумажно-масляной изоляции выше 600 °C
		Оксид углерода ( $CO$ )	Старение и увлажнение масла и/или твердой изоляции
		Диоксид углерода ( $CO_2$ )	Старение и увлажнение масла и/или твердой изоляции, нагрев твердой изоляции

Помимо контроля граничных значений газов в трансформаторном масле вид развивающегося дефекта в силовом трансформаторе определяется путем вычисления дробных соотношений концентраций определенных газов и сравнения их с граничными соотношениями. Пары соотношений можно разделить на три группы, как показано на рис. 1:

- 1) соотношения, которые свидетельствуют о дефектах, связанных с возникновением электрических разрядов (обозначение 1 на рис. 1);
- 2) соотношения, отображающие дефекты, связанные с перегревом (обозначение 2);
- 3) соотношения, которые свидетельствуют о дефектах, одновременно происходящих из-за электрических разрядов и перегрева (обозначения 3.1 и 3.2).

Приведенные на рис. 1 неравенства являются достоверными, если концентрация хотя бы одного из вышеперечисленных газов превышает свою граничную концентрацию более чем в 1,5 раза [8–10]. Для констатации факта наличия того или иного дефекта необходимо выполнение двух условий одновременно в любом из представленных в диаграмме секторов.

Далее необходимо установить, насколько быстро выявленный дефект может развиваться. Скорость нарастания выявленного дефекта находят по относительной скорости роста концентрации *i*-го газа в масле исходя из абсолютной и относительной скорости нарастания *i*-го газа в месяц. Степень опасности развития дефекта определяется относительной скоростью нарастания газа  $V_{\text{отн.}}$  измеряемой процентами в месяц.

При скорости роста концентрации газа более чем 10% в месяц выявленный дефект считается быстроразвивающимся (срок развития дефекта — от часов до недель) [8]. В этом случае рекомендовано проведение двух-трех повторных анализов ХАРГ для подтверждения вида и характера выявленного дефекта и принятия решения о дальнейшей работе трансформатора или о выводе трансформатора в ремонт [8–10].

Таким образом, анализ многоступенчатой системы производства ХАРГ тяговых трансформаторов позволяет заключить, что разработка программного обеспечения для автоматизации процесса

постановки диагноза состояния масляной изоляции актуальна и востребована на производстве.

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для разработки ПО был выбран интерпретируемый язык программирования Python со специальной интегрированной средой разработки PyCharm, что позволило написать программный код достаточно быстро путем автозаполнения специальных ячеек и оптимизации ПО использованием интегрированного отладчика ошибок.

В результате разработки исходное диалоговое окно программы «ХРОМАТИК» имеет вид, представленный на рис. 2.

Номера 1 и 2 в верхних клетках формы ввода данных предназначены для занесения показаний для первого и второго

тяговых трансформаторов соответственно. После внесения замеренных концентраций исследуемых газов программа сравнивает их с граничными значениями по [8–10] и в полях «Результат» выводит рассчитанные числовые значения.

В этом же окне, как показано на рис. 3, после проверки соотношений газов согласно табл. Г1 из [10] в полях «Результат» записывается поставленный диагноз состояния — есть превышение или оно отсутствует. Если превышение есть и выявлен дефект, то программа выводит на экран предположительный вид дефекта.

После того как была подтверждена адекватность программы и ее работоспособность на заведомо известных результатах ранних ХАРГ по данным ДВЖД с 2016 по 2020 г., был разработан и проверен на адекватность и точность блок прогнозирования результатов ХАРГ.

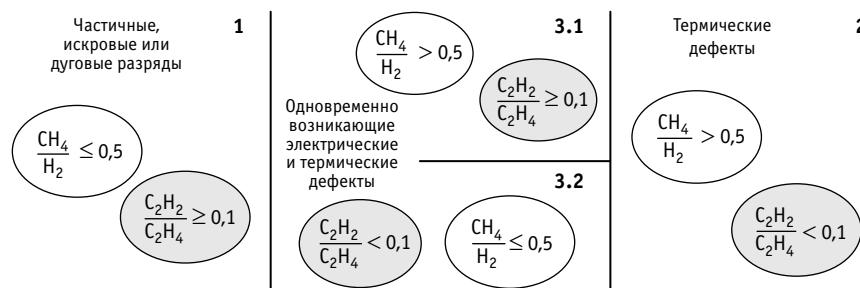


Рис. 1. Соотношения концентраций газов и соответствующие им характерные виды дефектов изоляции трансформатора

# Хроматик									
Введите показания газов из протокола:									
Водород H2 Метан CH4 Ацетилен C2H2 Этилен C2H4 Этан C2H6 Оксид углерода CO Диоксид углерода CO2									
№1	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат
№2	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат
Изменение	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат
Вотн% T,мес	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат
Состояние твёрдой изоляции: 5<CO2/CO<13									
Первые проверочные соотношения					Вторые проверочные соотношения				
CH4/H2 (<, >) 0,5		C2H2/C2H4 (<, >) 0,1		C2H2/C2H4		CH4/H2		C2H4/C2H6	
Результат		Результат		Результат		Результат		Результат	
Результат проверки соотношений									
Проверка, согласно таблице Г.1:									
1.Результат	2.Результат	3.Результат	4.Результат	5.Результат					
6.Результат	7.Результат	8.Результат	9.Результат						
Проверка на граничные значения газов в % об.									
Водород H2 Метан CH4 Ацетилен C2H2 Этилен C2H4 Этан C2H6 Оксид углерода CO Диоксид углерода CO2									
Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат

Рис. 2. Исходный вид окна ввода результатов ХАРГ

Так как для магистральных железных дорог энергетические характеристики плеч питания тяговых подстанций, определяющие загрузку тягового трансформатора (ток фидера контактной сети, напряжение плача питания и т.п.), отвечают требованиям стационарной случайной функции, то для прогноза состояния тягового трансформатора в качестве закона распределения ряда было принято нормальное (гауссовское) распределение [11].

В блок прогнозирования программы «ХРОМАТИК» было решено вывести графическую интерпретацию замеренных значений. Итоговый вид блока прогнозирования состояния изоляции трансформатора представлен на рис. 4.

Как показано на рис. 4, расчетом определены значения математического ожидания, дисперсии и среднеквадратического отклонения нормального закона распределения. Для визуализации результатов необходимо нажать кнопку «Получить график прогнозирования». При этом программа, используя ряд введенных чисел и вычисленные параметры, построит прогнозный график ожидаемой концентрации газа на временном интервале, который следует за последней датой внесения данных.

На рис. 5 в качестве примера представлен график изменения концентрации газа, на котором по оси абсцисс указаны временные интервалы от 1 до 5 и для них по оси ординат отмечены введенные ранее измеренные значения концентрации. Точка 6 по оси абсцисс соответствует прогнозное значение концентрации исследуемого газа, рассчитанное программой на основании нормального закона распределения.

В ходе проверки работоспособности блока прогноза были сделаны расчеты для периодов 2018–2020 гг., затем полученные прогнозные значения сравнивались с результатами замеров (рис. 6). Относительная погрешность расчета прогнозных значений концентраций газов не превышала 9 %, что допустимо и приемлемо при выполнении инженерных расчетов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования разработано программное обеспечение «ХРОМАТИК» [12]. Программа для ЭВМ состоит из двух блоков. Первый блок позволяет рассчитывать необходимые параметры для постановки диагноза

Ведите показания газов из протокола:						
№1	Водород H2	Метан CH4	Ацетилен C2H2	Этилен C2H4	Этан C2H6	Оксид углерода CO
№2	1	1	1	1	1	1
Изменение	-9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Вотн%	75.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Т.мес	12	Состояние твёрдой изоляции: Всё в норме				
CH4/H2 (с, > 0.5)			Первые проверочные соотношения		C2H2/C2H4 (<,>) 0.1	
0.1			1.0		Возможно возникновение частичного, искоревого или дугового разряда	
C2H2/C2H4			CH4/H2		C2H4/C2H6	
1.0			0.1		1.0	
Вторые проверочные соотношения						
Проверка, согласно таблице Г.1:						
1.Всё в норме	2.Всё в норме	3.Всё в норме	4.Всё в норме	5.Всё в норме		
6.Всё в норме	7.Всё в норме	8.Всё в норме	9.Всё в норме			
Проверка на граничные значения газов в % об.						
Водород H2 Метан CH4 Ацетилен C2H2 Этилен C2H4 Этан C2H6 Оксид углерода CO2						
Превышение Превышение Превышение Превышение Превышение Превышение Превышение						

Рис. 3. Вид вкладки ввода результатов ХАРГ после внесения данных

Ведите показания газов из протокола:							
№1	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	
№2	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	
Изменение	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	
Вотн%	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	Результат	
Т.мес	Состояние твёрдой изоляции: 5-CO2/CO<13						
CH4/H2 (с, > 0.5)			Первые проверочные соотношения		C2H2/C2H4 (<,>) 0.1		
Результат			Результат		Результат		
Результат проверки соотношений			Результат проверки соотношений				
C2H2/C2H4			Вторые проверочные соотношения		C2H4/C2H6		
Результат			Результат		Результат		
Проверка, согласно таблице Г.1:							
1.Результат	2.Результат	3.Результат	4.Результат	5.Результат			
6.Результат	7.Результат	8.Результат	9.Результат				
Проверка на граничные значения газов в % об.							
Водород H2 Метан CH4 Ацетилен C2H2 Этилен C2H4 Этан C2H6 Оксид углерода CO2							
Результат Результат Результат Результат Результат Результат Результат							
Ведите показание газа по годам:							
0.122	0.11495	0.07877	0.10326	0.07787	0.0937		
Математическое ожидание $\mu$ 0.098425							
Дисперсия D 0.0002805643583333324							
Стандартное отклонение $\sigma$ 0.016750055472544958							
Поставить диагноз		Начать прогнозирование			Получить график прогнозирования		

Рис. 4. Исходный вид окна блока прогнозирования программы «ХРОМАТИК»

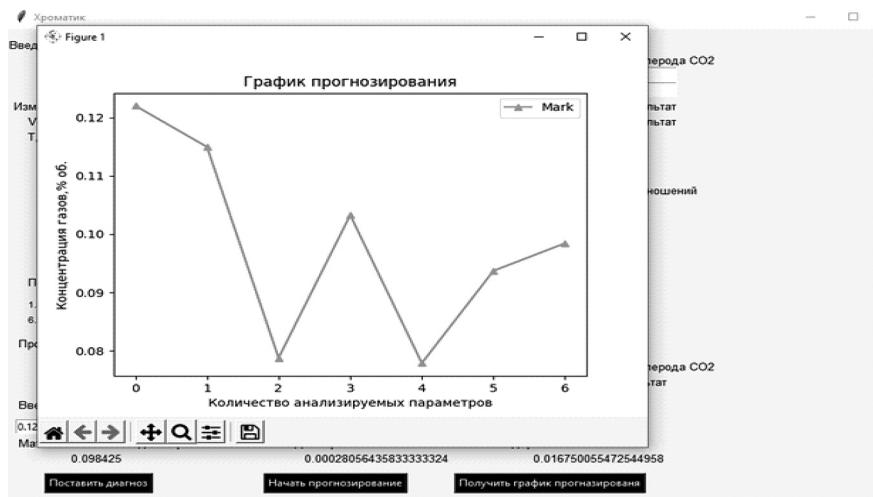


Рис. 5. Визуализация прогнозирования программы «ХРОМАТИК»

состояния тягового трансформатора. Второй блок прогнозирует содержание различных газов и их соотношений на перспективу, что дает возможность заблаговременно диагностировать развитие зарождающихся дефектов в масляной изоляции тягового трансформатора. Относительная погрешность программы не превышает 9 %. Программа передана для внедрения в ДЭЛ ДВЖД и может быть использована на сети железных дорог переменного тока для обнаружения повреждений и дефектов тяговых трансформаторов, мониторинга развития процессов старения изоляции и выявления дефектов на ранней стадии их возникновения. В дальнейшем с учетом развития технологий цифровизации железной дороги предложенная программа может быть использована в блоке прогнозной аналитики цифровых тяговых подстанций.

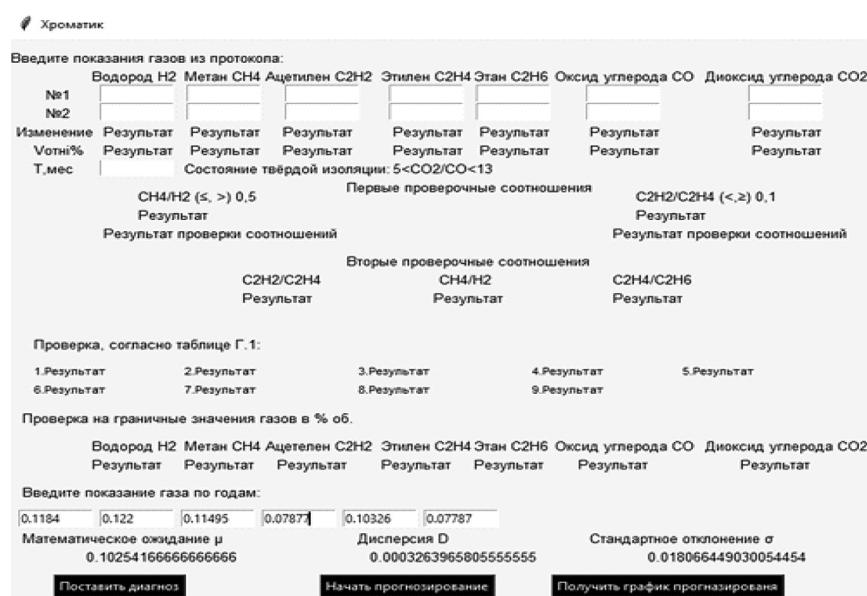


Рис. 6. Постановка прогнозного диагноза в программе «ХРОМАТИК»

## Литература

- Орехов Э. А., Абрамов В. В. Методы неразрушающего контроля электротехнического оборудования // Энергоэксперт. 2020. № 2 (74). С. 16–19. ISSN 2075–6518.
- От неразрушающего контроля к прогнозу состояния: тенденции развития цифровой транспортной энергетики / С. И. Макашева, М. О. Притуленко, К. В. Кузнецова, Е. А. Мигилева // Вестник Института тяги и подвижного состава. 2020. № 16. С. 43–46.
- Алюнов А. Н., Вяткина О. С., Немировский А. Е. Об эффективности цифровой системы проактивной диагностики силовых трансформаторов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 5 (154). С. 966–976. ISSN 1814–3520.
- Makasheva S., Pinchukov P. Expanding the Functionality of Automated Monitoring Systems for Traction Substations // MATEC Web of Conferences. 2018. P. 01014. DOI: 10.1051/matecconf/201823901014
- Makasheva S. I. An automated monitoring system as an instrument of lean production of a traction power supply system // Russian Electrical Engineering. 2016. Vol. 87. No. 2. Pp. 107–109. DOI: 10.3103/S1068371216020139. ISSN 1068–3712. eISSN 1934–8010.
- Макашева С. И., Пинчуков П. С. Устройства релейной защиты в условиях тяжеловесного движения // Железнодорожный транспорт. 2018. № 8. С. 40–42. ISSN 0044–4448.
- Хроматэк. Лабораторная газовая хроматография. URL: <https://chromatec.ru/products/gc/> (дата обращения: 08.06.2021).
- РД 34.46.303–98. Методические указания по подготовке и проведению хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4294844/4294844743.htm> (дата обращения: 10.06.2021).

## References

- Orehov E. A., Abramov V. V. Methods for non-destructive testing of electrical equipment [Metody nerazrushayushhego kontrolya elektrotehnicheskogo oborudovaniya] // Energoexpert. 2020. No. 2 (74). Pp. 16–19. ISSN 2075–6518.
- From non-destroying control to forecasting the state: digital transport energy development trends [Ot nerazrushayushhego kontrolya k progonu sostoyaniya: tendentsii razvitiya tsifrovoy transportnoy energetiki] / S. I. Makasheva, M. O. Pritulenko, K. V. Kuznetsov, E. A. Migileva // Bulletin of the Traction and Rolling Stock Institute. 2020. No. 16. Pp. 43–46.
- Alyunov A. N., Vyatkina O. S., Nemirovskiy A. E. On efficiency of digital system of power transformer proactive diagnostics [Ob effektivnosti tsifrovoy sistemy proaktivnoy diagnostiki silovykh transformatorov] // Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020. Vol. 24. No. 5 (154). Pp. 966–976. ISSN 1814–3520.
- Makasheva S., Pinchukov P. Expanding the Functionality of Automated Monitoring Systems for Traction Substations // MATEC Web of Conferences. 2018. P. 01014. DOI: 10.1051/matecconf/201823901014
- Makasheva S. I. An automated monitoring system as an instrument of lean production of a traction power supply system // Russian Electrical Engineering. 2016. Vol. 87. No. 2. Pp. 107–109. DOI: 10.3103/S1068371216020139. ISSN 1068–3712. eISSN 1934–8010.
- Makasheva S. I., Pinchukov P. S. AC catenary relay protection under heavy haul traffic condition [Ustroystva releynoy zashchity v usloviyah tyazhelovesnogo dvizheniya] // Railway Transport. 2018. No. 8. Pp. 40–42. ISSN 0044–4448.
- Chromatec. Gas chromatographs [Khromatek. Laboratornaya gazovaya khromatografiya]. URL: <https://chromatec.ru/products/gc/> (access date: 08.06.2021).
- Guidance document 34.46.303–98. Guidelines for the preparation and conduct of dissolved gas analysis in power transformers oil [RD 34.46.303–98. Metodicheskie ukazaniya po podgotovke i povedeniyu khromatograficheskogo analiza gazov, rastvorennykh v masle silovykh transformatorov]. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4294844/4294844743.htm> (access date: 10.06.2021).

9. Правила содержания тяговых подстанций и линейных устройств системы тягового электрооборудования : распоряжение ОАО «РЖД» от 05.08.2016 г. № 1587р. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=720904#yLdz3eS8J9npgqaw> (дата обращения: 10.06.2021).
10. РД 153-34.0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4294845/4294845319.htm> (дата обращения: 10.06.2021).
11. Макашева С. И. Мониторинг качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения переменного тока. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2009. 103 с.
12. Прогнозирование состояния трансформаторного масла на основе его хроматографического анализа (ХРОМАТИК) / С. И. Макашева, К. В. Кузнецов, П. С. Пинчуков : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021660475 Российской Федерации. № 2021619368 ; заявл. 15.06.2021 ; опубл. 25.06.2021. URL: [https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet) (дата обращения: 10.07.2021).
9. Rules for the maintenance of traction substations and linear devices of the traction electrical equipment system : Order of JSC «RZD» dated 05.08.2016 No. 1587r [Pravila soderzhaniya tyagovykh podstantsiy i lineynykh ustroystv sistemy tyagovogo elektrooborudovaniya : rasporyazhenie OAO «RZD» ot 05.08.2016 g. № 1587r]. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=720904#yLdz3eS8J9npgqaw> (access date: 10.06.2021).
10. Guidance document 153-34.0-46.302-00. Guidelines for the diagnosis of developing defects in transformer equipment based on the results of dissolved gas in oil analysis [RD 153-34.0-46.302-00. Metodicheskie ukazaniya po diagnostike razvivayushchikhsya defektov transformatornogo oborudovaniya po rezul'tatam khromatograficheskogo analiza gazov, rastvorennykh v masle]. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4294845/4294845319.htm> (access date: 10.06.2021).
11. Makasheva S. I. Power quality monitoring in the ac traction power supply system [Monitoring kachestva elektricheskoy energii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka]. Khabarovsk: Publishing House of FESTU, 2009. 103 p.
12. Prediction of the state of transformer oil based on its chromatographic analysis (CHROMATIC) [Prognozirovaniye sostoyaniya transformatornogo masla na osnove ego khromatograficheskogo analiza (KhROMATIK)] / S. I. Makasheva, K. V. Kuznetsov, P. S. Pinchukov : certificate of state registration of a computer program 2021660475 Russian Federation. No. 2021619368 ; filed 15.06.2021 ; publ. 25.06.2021. URL: [https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet) (access date: 10.07.2021).

Объем статьи 0,72 авторских листа

УДК 621.331:621.311.4:621.314.5

Юрий Павлович Неугодников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Иван Павлович Неугодников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Yuriy Pavlovich Neugodnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Ivan Pavlovich Neugodnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Rectifying and inverter transformers with output voltage regulation for direct current traction substations

#### Аннотация

Рассмотрены схема, основные технические характеристики и режимы работы 12-пульсовых тиристорных выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП) с регулированием выходного напряжения, применяемых в настоящее время на тяговых подстанциях Октябрьской железной дороги на электрифицированных участках с высокоскоростным движением поездов. Предложена схема 12-пульсового ВИП с регулированием выходного напряжения и использованием диодного выпрямителя. Выполнен сравнительный анализ, определены преимущества, недостатки и область применения рассмотренных вариантов 12-пульсовых ВИП с быстродействующим бесконтактным тиристорным регулированием выходного напряжения для электрифицированных участков железных дорог с высокоскоростным или тяжеловесным движением поездов.

**Ключевые слова:** тяга поездов, рекуперативное торможение, тяговые подстанции, выпрямительно-инверторные преобразователи, преобразовательные трансформаторы, регулирование напряжения, потери электроэнергии.

#### Summary

The paper considers a scheme, main technical characteristics and operation modes of 12-pulse thyristor rectifying and inverter transformers (RIT) with output voltage regulation that are currently used on the October Railway on electrified sections with high-speed traffic. The authors propose a scheme of a 12-pulse RIT with output voltage regulation and the use of a diode rectifier. They have carried out a comparative analysis, determined advantages, disadvantages and a sphere of application of considered variants of 12-pulse RITs with fast-response contactless thyristor regulation of output voltage for electrified sections of railways with high-speed and heavy traffic.

**Keywords:** traction of trains, regenerative braking, traction substations, rectifying and inverter transformers, converter transformers, voltage regulation, energy losses.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-120-124

**В** условиях растущих объемов перевозок, развития скоростного и тяжеловесного движения на электрифицированных участках железных дорог постоянного тока актуальна задача по снижению расхода электрической энергии на тягу поездов, уменьшению потерь и повышению качества потребляемой электроэнергии. В связи с этим одними из основных энергосберегающих технических решений ОАО «РЖД» могут стать применение электроподвижным составом (ЭПС) рекуперативного торможения и повышение уровня напряжения в тяговой сети. Реализация этих мероприятий позволит не только сэкономить электрическую энергию при рекуперации, но и повысить безопасность и скорость движения поездов, а следовательно, увеличить пропускную способность электрифицированных участков железных дорог постоянного тока [1].

При этом для повышения эффективности рекуперативного торможения выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП) должны обеспечить на шинах 3,3 кВ тяговой подстанции минимальные значения напряжения холостого хода на уровне 3500–3600 В, а для уменьшения потерь электроэнергии и увеличения пропускной способности в режиме тяги — регулирование напряжения на уровне 3600–3800 В [2].

Один из наиболее экономичных способов бесконтактного регулирования напряжения на шинах 3,3 кВ тяговой подстанции — применение вольтодобавочных тиристорных преобразователей с параллельным соединением тиристорных секций. Преобразовательный агрегат с регулированием напряжения по 6-пульсовой

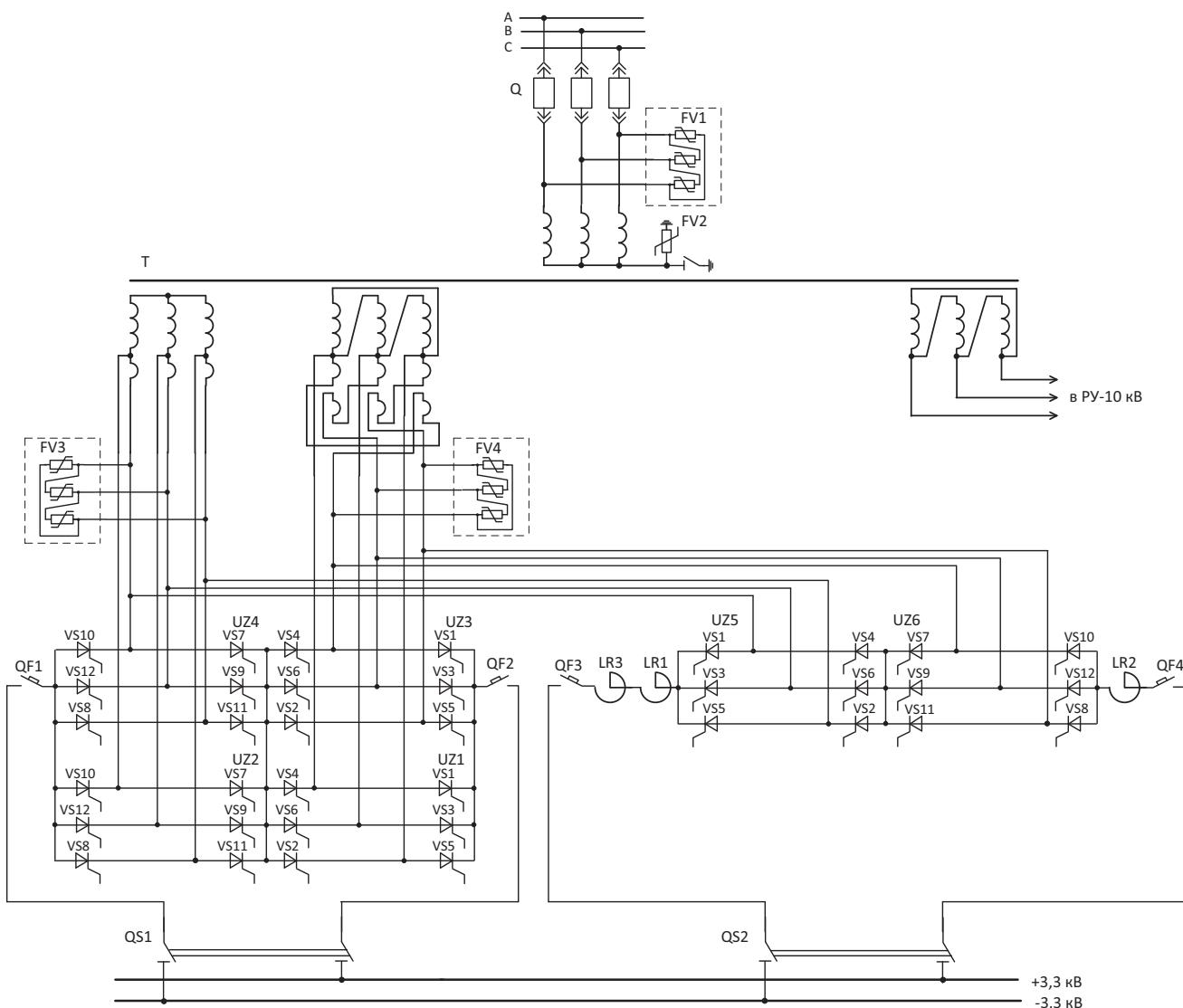


Рис. 1. Двенадцатипульсовый ВИП с тиристорным выпрямителем и регулированием выходного напряжения

мостовой схеме был разработан сотрудниками ВНИИЖТ под руководством доктора технических наук С. Д. Соколова и испытан на Западно-Сибирской железной дороге [2–4].

В настоящее время совершенствование преобразователей тяговых подстанций идет по пути повышения их фазности (пульсности). В частности, широкое применение находят преобразователи по 12-пульсовым схемам, которые имеют более высокие энергетические показатели и характеристики по сравнению с 6-пульзовыми [5–12]. В соответствии с этим по заданию Департамента электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» сотрудниками ВНИИЖТ и УрГУПС проведены исследования по разработке 12-пульсового тиристорного ВИП с быстродействующим бесконтактным регулированием выходного напряжения постоянного тока и параллельным соединением тиристорных секций (рис. 1) [13–16].

Такие регулируемые тиристорные ВИП (см. рис. 1) применяются на тяговых подстанциях с одноступенчатой транс-

формацией 110/3,3 кВ высокоскоростного участка Москва — Санкт-Петербург Октябрьской железной дороги, где требуется регулирование напряжения в контактной сети. Это позволяет значительно снизить капитальные затраты (в 2 раза) на трансформаторное оборудование тяговых подстанций за счет отсутствия понизительных трансформаторов (которые применяются при двухступенчатой трансформации), а также обеспечить прием избыточной энергии рекуперации и требуемый уровень напряжения на пантографе ЭПС.

В данной схеме применяется преобразовательный трансформатор Т типа ТРДТНП-20000/110ИУ1 с РН ( $\pm 9 \times 1,25\%$ ). Выпуск трансформаторов осуществляется ОАО «Уралэлектротяжмаш» (г. Екатеринбург).

Трансформатор Т имеет сетевую обмотку (состоящую из основной и регулировочной обмоток), две вентильные обмотки («звезда с отпайками» и «треугольник с зигзагами») и дополнительную вторичную обмотку напряжением 10 кВ

для питания собственных нужд тяговой подстанции и нетяговой нагрузки. Дополнительные секции вентильных обмоток (ВО) позволяют увеличить линейные напряжения ВО на 16 %. К выводам основных секций подключается 12-пульсовый тиристорный выпрямитель UZ1–UZ2 типа В-ТПЕТ-1,6к-4к на номинальный ток 1600 А, к выводам дополнительных секций — 12-пульсовый тиристорный регулятор UZ3–UZ4, в качестве которого используется 12-пульсовый тиристорный выпрямитель типа В-ТПЕТ-3,15к-4к на номинальный ток 3150 А, а также инвертор UZ5–UZ6 типа И-ПТЕТ-1,6к-4к на ток 1600 А.

Преобразователи UZ1–UZ2, UZ3–UZ4, UZ5–UZ6 собраны на базе унифицированных силовых тиристорных секций с естественным охлаждением: тиристорный выпрямитель UZ1–UZ2 — одна секция, тиристорный регулятор UZ3–UZ4 — две секции, инвертор UZ5–UZ6 — одна секция. Каждая унифицированная тиристорная секция выполнена на ток 1600 А, номинальное напряжение 4000 В и конструктивно состоит из трех шкафов. В каждом шкафу расположено по четыре тиристорных блока типа БСЕ1-3ИТ8-20УХЛ4, выполненных на мощных таблеточных тиристорах Т173-2000-20 с применением охладителей Т341 на тепловых трубах.

Режим работы ВИП — бесконтактно-переключаемый (раздельный), при котором тиристорный выпрямитель с тиристорным регулятором или инвертор поочередно подключены к шинам 3,3 кВ. В данном случае быстродействующие выключатели QF1–QF4 могут быть постоянно включенными, а на инвертор или на тиристорный выпрямитель с тиристорным регулятором поочередно подаются импульсы управления. При этом переход ВИП из выпрямительного в инверторный режим осуществляется по командам блока логико-программного управления в зависимости от ситуации в тяговой сети (режим тяги или режим рекуперативного торможения).

Для снижения уровня радиопомех в цепь анода и катода UZ5–UZ6 инвертора включены два помехозащитных реактора LR1 и LR2 типа РОСВ-2000 индуктивностью 0,88 мГн. Чтобы ограничить токи циркуляции между тиристорным выпрямителем и инвертором и токи опрокидывания инверторов, в цепь инвертируемого тока включен токоограничивающий реактор LR3 типа РБФА-У-6500/3250 индуктивностью 18 мГн.

К шинам постоянного напряжения тиристорный выпрямитель UZ1–UZ2 и тиристорный регулятор UZ3–UZ4 подключаются быстродействующими катодными выключателями QF1 и QF2 типа ВАБ-49-4000/30-К-УХЛ4, а инвертор UZ5–UZ6 — быстродействующими линейными выключателями QF3 и QF4 типа ВАБ-49-4000/30-Л-УХЛ4. Защита ВИП от перенапряжений со стороны переменного тока достигается установкой ограничителей перенапряжений FV3 и FV4 типа ОПН-1,5УХЛ1, включенных на линейное напряжение вентильных обмоток преобразовательного трансформатора.

Данные регулируемые 12-пульсовые тиристорные ВИП позволяют получить широкий диапазон регулирования внешних характеристик (3600–3800 В) в выпрямительном и входных (3500–3700 В) — в инверторном режиме. Регулирование напряжения на выходе ВИП в тяговом режиме осуществляется системой импульсно-фазового управления (СИФУ) тиристоров регулятора UZ3–UZ4. При этом угол открытия тиристо-

ров  $\alpha$  регулятора UZ3–UZ4 изменяется по заданному закону от 120 до 0 эл. град, а угол открытия тиристоров выпрямителя UZ1–UZ2 принят постоянным, равным 0 эл. град (для повышения энергетических показателей тиристорного выпрямителя коммутация токов происходит в точках естественной коммутации). Регулирование входных характеристик в инверторном режиме осуществляется системой СИФУ тиристоров инвертора UZ5–UZ6 путем изменения угла опережения  $\beta$  в диапазоне 22–28 эл. град.

Установлено, что за счет повышения фазности (пульсности) преобразователей (с 6- до 12-пульсовой) обеспечивается существенное повышение энергетических показателей ВИП (коэффициента мощности и КПД), улучшение качества сетевого тока и выпрямленного напряжения, а также уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети.

Важная особенность тиристорных преобразователей — реализация в их конструктивном исполнении гашения аварийных токов короткого замыкания путем снятия импульсов управления с тиристоров выпрямителя UZ1–UZ2 и одновременного перевода импульсов управления регулятора UZ3–UZ4 на противо-ЭДС. Это позволяет значительно уменьшить воздействие аварийных токов на оборудование тяговых подстанций и повысить надежность его работы.

На рис. 2 приведена принципиальная схема 12-пульсового ВИП с диодным выпрямителем и бесконтактным регулированием выходного напряжения.

Особенность предлагаемой схемы ВИП с диодным выпрямителем — необходимость установки токоограничивающих реакторов LR3–LR5 типа РБФА-У-6500/3250 индуктивностью 9 мГн и быстродействующих выключателей QF3–QF5 типа ВАБ-49-4000/30-Л-УХЛ4 в цепь инвертируемого тока для ограничения токов циркуляции между выпрямителем и инвертором, а также для ограничения токов опрокидывания инвертора [14, 15]. Назначение другого и дополнительного основного оборудования ВИП с диодным выпрямителем UZ1–UZ2 (см. рис. 2) аналогично схеме регулируемого ВИП с тиристорным выпрямителем UZ1–UZ2 (см. рис. 1).

Использование диодного выпрямителя UZ1–UZ2 на ток 3150 А вместо тиристорного выпрямителя UZ1–UZ2 на номинальный ток 1600 А позволяет снизить потери мощности в диодах выпрямителя при номинальном токе на величину 6,4 кВт и обеспечить надежную работу ВИП в случае вывода в ремонт системы управления тиристорами регулятора UZ3–UZ4.

## ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ схем и режимов работы 12-пульсовых регулируемых ВИП с параллельным соединением тиристорных секций, применяемых на тяговых подстанциях Октябрьской железной дороги на электрифицированных участках с высокоскоростным движением поездов.

2. Регулируемые 12-пульсовые ВИП с бесконтактным тиристорным регулированием напряжения позволяют:

повысить уровень напряжения на шинах тяговых подстанций постоянного тока для достижения требуемого уровня напряжения на токоприемнике ЭПС на участках железных дорог с высокоскоростным или тяжеловесным движением;

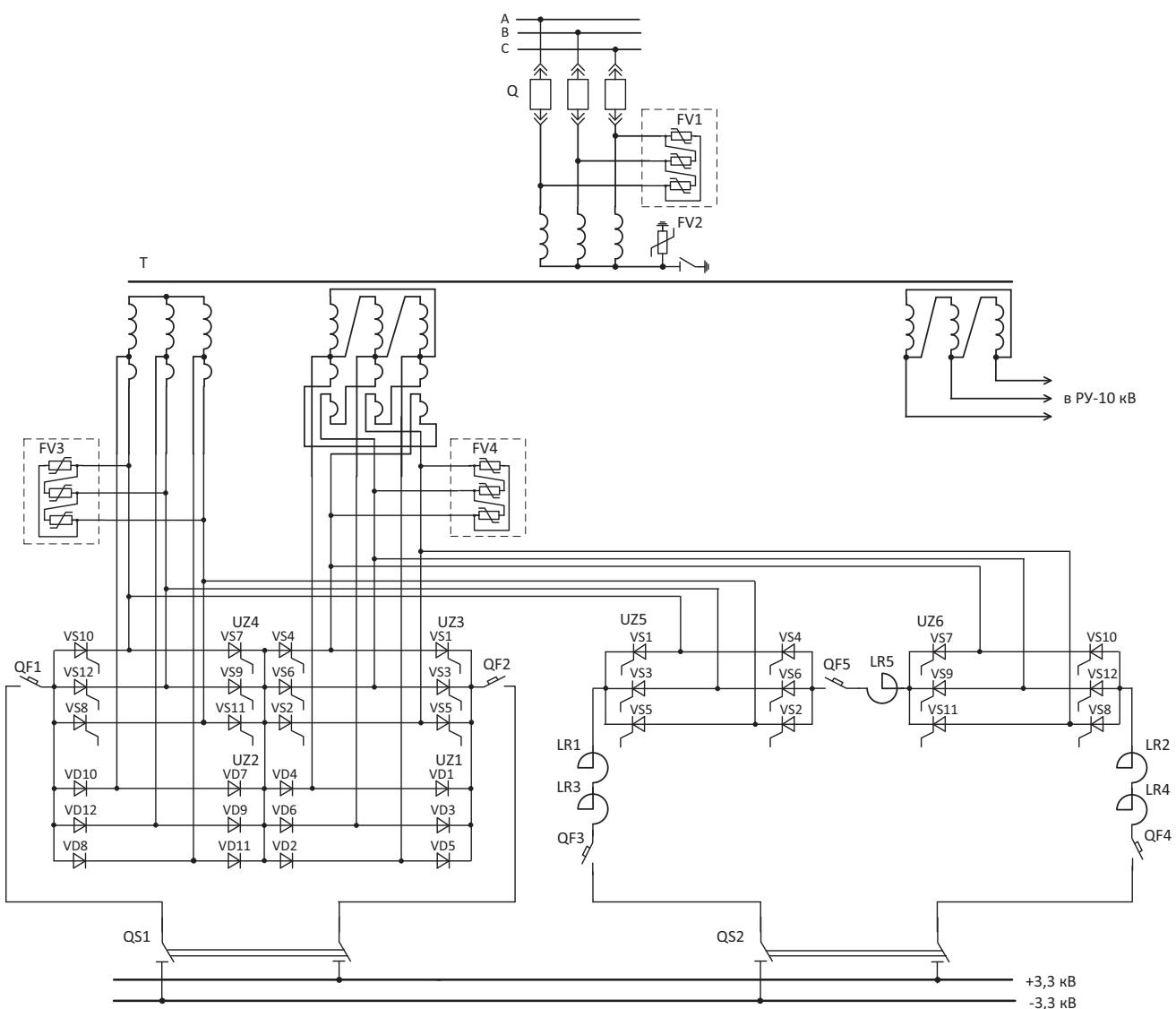


Рис. 2. 12-пульсовый ВИП с диодным выпрямителем и регулированием выходного напряжения

обеспечить надежный прием энергии рекуперации при рекуперативном торможении ЭПС и повысить безопасность движения поездов;

достичь высоких технико-экономических показателей и надежной работы в нормальных и аварийных режимах работы преобразователей.

3. Предложена схема регулируемого 12-пульсового ВИП с диодным выпрямителем, который позволяет уменьшить потери электроэнергии в силовых диодах выпрямителя и обеспечить надежную работу ВИП в случае вывода в ремонт системы управления силовыми тиристорами регулятора.

## Литература

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 г. № 2537р. Москва, 2016. 76 с.
  2. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций / С. Д. Соколов, Ю. М. Бей, Я. Д. Гуральник, О. Г. Чаусов. Москва : Транспорт, 1979. 264 с.

## References

1. The energy strategy of the holding Russian Railways for the period until 2020 and for the future until 2030 [Energeticheskaya strategiya kholdinga «Rossijskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda] : approved by the Order of JSC Russian Railways dated 14.12.2016 No. 2537r. Moscow, 2016. 76 p.
  2. Semiconductor converting devices of traction substations [Poluprovodnikovye preobrazovatel'nye agregaty tyagovykh podstantsiy] / S. D. Sokolov, Yu. M. Bey, Ya. D. Gural'nik, O. G. Chusov. Moscow : Transport, 1979. 264 p.

3. Агрегаты с параллельным соединением преобразовательных секций для регулирования выпрямленного напряжения / С. Д. Соколов, Т. П. Добровольский, И. Г. Глухов, В. В. Руденский // Повышение надежности и эффективности системы тягового электроснабжения : труды ВНИИЖТ. Москва : Транспорт, 1979. Вып. 618. С. 101–114.
4. Экспериментальные исследования выпрямительно-инверторного агрегата с регулированием выпрямленного напряжения / С. Д. Соколов, Н. Н. Волков, В. В. Руденский [и др.] // Повышение надежности и эффективности системы тягового электроснабжения : труды ВНИИЖТ. Москва : Транспорт, 1979. Вып. 618. С. 121–126.
5. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций / Б. С. Барковский, Г. С. Магай, В. П. Маценко [и др.]; под ред. М. Г. Шалимова. Москва : Транспорт, 1990. 127 с.
6. Неугодников Ю. П., Неугодников И. П. Оценка энергетических показателей 12- и 24-пульсовых выпрямительно-инверторных преобразователей тяговых подстанций // Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте : сборник научных трудов. Екатеринбург : УрГАПС, 1995. Вып. 3 (85). С. 71–82.
7. 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.
8. 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.
9. 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 : сборник научных трудов. Екатеринбург : УрГУПС, 2009. Вып. 70 (153). С. 66–78.
10. Неугодников Ю. П. Аварийные режимы многопульсовых инверторных преобразователей тяговых подстанций // Повышение надежности работы устройств электроснабжения железных дорог : сборник научных трудов. Екатеринбург : УрГУПС, 2000. Вып. 13 (95). С. 121–131.
11. Неугодников И. П. Токи циркуляции в двенадцатифазных схемах непереключаемых выпрямительно-инверторных преобразователей // Вестник ВНИИЖТ. 1987. № 8. С. 21–25. ISSN 2223–9731.
12. Неугодников И. П., Соколов С. Д. Аварийные режимы двенадцатифазного инвертора тяговой подстанции // Вестник ВНИИЖТ. 1988. № 6. С. 19–22. ISSN 2223–9731.
13. Неугодников Ю. П., Низов А. С., Штин А. Н. Инвертирование электрической энергии на электрифицированных железных дорогах. Ч. 2. Выпрямительно-инверторные преобразователи тяговых подстанций : учебное пособие. Екатеринбург : УрГУПС, 2002. 83 с.
14. 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 : труды ВНИИЖТ. Москва : Интект, 2003. С. 107–111.
15. Выпрямительные и выпрямительно-инверторные преобразователи с регулированием напряжения / Т. П. Добровольский, В. В. Руденский, В. А. Зимаков [и др.] // Фундаментальные и прикладные исследования — транспорту-2000 : труды Всероссийской научно-технической конференции. Екатеринбург : УрГУПС, 2000. Ч. 1. С. 291–293.
16. Анализ технического состояния, режима работы и эффективности использования выпрямительно-инверторных агрегатов (2.026.Р) : отчет по НИР / УрГУПС ; рук. Неугодников Ю. П. Екатеринбург, 2012. 127 с.
3. Units with parallel connection of converter sections for regulation of rectified voltage [Agregaty s parallel'nym soedineniem preobrazovatel'nykh sektsiy dlya regulirovaniya vypryamленnogo napryazheniya] / S. D. Sokolov, T. P. Dobrovolskis, I. G. Glukhov, V. V. Rudenskiy // Improving for reliability and efficiency of the traction power supply system : scientific papers of VNIIZhT. Moscow : Transport, 1979. Issue 618. Pp. 101–114.
4. Experimental study of a rectifying and inverter unit with regulation of rectified voltage [Ekspperimental'nye issledovaniya vypryamitel'no-invertornogo agregata s regulirovaniem vypryamленnogo napryazheniya] / S. D. Sokolov, N. N. Volkov, V. V. Rudenskiy [et al.] // Improving for reliability and efficiency of the traction power supply system : scientific papers of VNIIZhT. Moscow : Transport, 1979. Issue 618. Pp. 121–126.
5. Twelve-pulse semiconductor rectifiers of traction substations [Dvenadtsatipul'sovye poluprovodnikovye vypryamiteli tyagovykh podstantsiy] : monograph // B. S. Barkovskiy, G. S. Magay, V. P. Matsenko [et al.] ; ed. by M. G. Shalimov. Moscow : Transport, 1990. 127 p.
6. Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov I. P. Assessment of energy indicators of 12-pulse and 24-pulse rectifying and inverter transformers for traction substations [Otseka energeticheskikh pokazateley 12- i 24-pul'sovykh vypryamitel'no-invertornykh preobrazovateley tyagovykh podstantsiy] // Energy-saving technologies on railway transport : collection of scientific papers. Ekaterinburg : UrGAPS, 1995. Issue 3 (85). Pp. 71–82.
7. Neugodnikov Yu. P. External and limiting characteristics of 12-pulse and 24-pulse inverter transformers of traction substations [Vneshnie i ogranicitel'nye kharakteristiki 12- i 24-pul'sovykh invertornykh preobrazovateley tyagovykh podstantsiy] // Transport of the Urals. 2006. No. 1 (8). Pp. 28–37. ISSN 1815–9400.
8. 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 [Vneshnie kharakteristiki i energeticheskie pokazateli 12- i 24-pul'sovykh preobrazovateley povyshennogo napryazheniya 6,6 i 13,2 kV] // Transport of the Urals. 2007. No. 4 (15). Pp. 80–85. ISSN 1815–9400.
9. Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov A. Yu. Energy indicators of 12-pulse and 24-pulse inverters and controlled rectifiers of traction substations [Energeticheskie pokazateli 12- i 24-pul'sovykh invertorov i upravlyayemykh vypryamiteley tyagovykh podstantsiy] // Development and improvement of electric equipment for railway power supply system : collection of scientific papers. Ekaterinburg : USURT, 2009. Issue 70 (153). Pp. 66–78.
10. Neugodnikov Yu. P. Emergency states of multi-pulse inverter transformers for traction substations [Avariynye rezhimy mnogopul'sovykh invertornykh preobrazovateley tyagovykh podstantsiy] // Increase of operation reliability of railway power supply system : collection of scientific papers. Ekaterinburg : USURT, 2000. Issue 13 (95). Pp. 121–131.
11. Neugodnikov I. P. Circulation currents in 12-phase schemes of non-switchable rectifying and inverter transformers [Toki tsirkulyatsii v dvenadtsatipafaznykh skhemakh nepereklyuchayemykh vypryamitel'no-invertornykh preobrazovateley] // VNIIZhT Scientific Journal. 1987. No. 8. Pp. 21–25. ISSN 2223–9731.
12. Neugodnikov I. P., Sokolov S. D. Emergency states of 12-phase inverter of traction substations [Avariynye rezhimy dvenadtsatipafaznogo invertora tyagovykh podstantsii] // VNIIZhT Scientific Journal. 1988. No. 6. Pp. 19–22. ISSN 2223–9731.
13. 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 [Invertirovaniye elektricheskoy energii na elektrifitsirovannykh zheleznykh dorogakh. Ch. 2. Vypryamitel'no-invertornye preobrazovateli tyagovykh podstantsiy] : textbook. Ekaterinburg : USURT, 2002. 83 p.
14. Rectifying and reversible units with output voltage regulation for traction substations [Vypryamitel'nyy i vypryamitel'no-invertornyy agregaty s regulirovaniem vykhodnogo napryazheniya dlya tyagovykh podstantsiy] / V. V. Rudenskiy, T. P. Dobrovolskis, V. A. Zimakov [et al.] // New in power supply economy : scientific papers of VNIIZhT. Moscow : Intext, 2003. Pp. 107–111.
15. Rectifying and reversible transformers with voltage regulation [Vypryamitel'nye i vypryamitel'no-invertornye preobrazovateli s regulirovaniem napryazheniya] / T. P. Dobrovolskis, V. V. Rudenskiy, V. A. Zimakov [et al.] // Fundamental and applied researches for transport — 2000 : scientific papers of All-Russian scientific and technical conference. Ekaterinburg : USURT, 2000. Part 1. Pp. 291–293.
16. Analysis of technical condition, operation mode and efficiency of rectifying and inverter units (2.026.R) [Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya, rezhma raboty i effektivnosti ispol'zovaniya vypryamitel'no-invertornykh agregatov (2.026.R)] : report on research work / USURT ; executive Neugodnikov Yu. P. Ekaterinburg, 2012. 127 p.

**Подписка на 2022 год.**

Периодичность — 4 номера в год.

ф. СП-1	<p><b>АБОНЕМЕНТ</b>      на <small>газету</small> <small>журнал</small>      <b>46463</b> <small>(индекс издания)</small></p> <p><b>Транспорт Урала</b></p> <table border="1"><tr><td colspan="6">(наименование издания)</td><td colspan="6">Количество комплектов:</td></tr><tr><td colspan="12">на 2022 год по месяцам:</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr><tr><td>Х</td><td>Х</td><td>Х</td><td>Х</td><td>Х</td><td>Х</td><td>Х</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table> <p><b>Куда</b>      (почтовый индекс)      (адрес)</p> <p><b>Кому</b>      (фамилия, инициалы)</p>												(наименование издания)						Количество комплектов:						на 2022 год по месяцам:												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х					
(наименование издания)						Количество комплектов:																																																						
на 2022 год по месяцам:																																																												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																																	
Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х																																																						
<p><b>ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА</b>      на <small>газету</small> <small>журнал</small>      <b>46463</b> <small>(индекс издания)</small></p> <p><b>Транспорт Урала</b></p> <table border="1"><tr><td>ПВ</td><td>место</td><td>литер</td><td>подписки</td><td>руб.</td><td>коп.</td><td>Количество комплектов:</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td>переадресовки</td><td>руб.</td><td>коп.</td><td></td><td></td></tr></table> <p>на 2022 год по месяцам:</p> <table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr><tr><td>Х</td><td>Х</td><td>Х</td><td>Х</td><td>Х</td><td>Х</td><td>Х</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table> <p><b>Куда</b>      (почтовый индекс)      (адрес)</p> <p><b>Кому</b>      (фамилия, инициалы)</p>													ПВ	место	литер	подписки	руб.	коп.	Количество комплектов:					переадресовки	руб.	коп.			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х													
ПВ	место	литер	подписки	руб.	коп.	Количество комплектов:																																																						
			переадресовки	руб.	коп.																																																							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																																	
Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х																																																						

## **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-vypusknikov-urgups>

<b>Извещение</b>	<p><b>Получатель:</b> Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС <b>КПП:</b> 667001001 <b>ИНН:</b> 6670317893 <b>ОКТМО:</b> 65701000 <b>Р/сч.:</b> 40703810863010000192 <b>в:</b> ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ <b>БИК:</b> 046577795 <b>К/сч.:</b> 30101810900000000795 <b>Код бюджетной классификации (КБК):</b> _____ <b>Платеж:</b> Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС <b>Плательщик:</b> _____ <b>Адрес плательщика:</b> _____ <b>ИНН плательщика:</b> _____ <b>№ л/сч. плательщика:</b> _____ <b>Сумма:</b> _____ руб. ____ коп.  Подпись: _____ Дата: «____» 2022 г.</p>
<b>Квитанция</b>	<p><b>Получатель:</b> Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС <b>КПП:</b> 667001001 <b>ИНН:</b> 6670317893 <b>ОКТМО:</b> 65701000 <b>Р/сч.:</b> 40703810863010000192 <b>в:</b> ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ <b>БИК:</b> 046577795 <b>К/сч.:</b> 30101810900000000795 <b>Код бюджетной классификации (КБК):</b> _____ <b>Платеж:</b> Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС <b>Плательщик:</b> _____ <b>Адрес плательщика:</b> _____ <b>ИНН плательщика:</b> _____ <b>№ л/сч. плательщика:</b> _____ <b>Сумма:</b> _____ руб. ____ коп.  Подпись: _____ Дата: «____» 2022 г.</p>

