

ТРАНСПОРТ УРАЛА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАНЖИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ЗЕЛЕНОЙ ЛОГИСТИКИ
КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ FUZZY AHP-TOPSIS

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА
ДЛЯ СЛУЧАЯ ВОЗНИКШИХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ
ВО ВРЕМЯ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СТД-МПК

АУДИТ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ
НА ФЕДЕРАЛЬНЫХ ТРАССАХ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА





К юбилею Александра Васильевича Ефимова

18 марта исполнилось 80 лет Александру Васильевичу Ефимову (1940–2016), талантливому инженеру, ученому, педагогу, руководителю, почетному железнодорожнику, первому главному редактору журнала «Транспорт Урала», бесконечно уважаемому, замечательному, незаурядному человеку.

Профессиональная деятельность Александра Васильевича была безраздельно посвящена единственному и любимому делу — развитию железнодорожного транспорта и транспортной науки, обучению, подготовке и воспитанию высококвалифицированных железнодорожных кадров. Вся трудовая жизнь Александра Васильевича была неразрывно связана

с родным УЭМИИТом (с 1999 года — Уральский государственный университет путей сообщения). Окончив вуз в 1963 году, Александр Васильевич прошел путь ассистента, доцента, профессора, заведующего кафедрой электроснабжения, проректора по учебной работе, а в 1990 году общим собранием коллектива он был избран на должность ректора, которую занимал в течение 17 лет.

Александр Васильевич возглавил вуз в очень непростые, переломные времена, когда вся страна находилась на грани выживания. В тех неимоверно сложных условиях становления новых экономических, социальных, общественных отношений нужно было сохранить вуз — материально-техническую базу, трудовой коллектив, профессорско-преподавательский состав, уровень обучения студентов. И Александр Васильевич благодаря своим организаторским способностям и человеческим качествам, поддержке и помощи сотрудников не просто решил эту задачу, а дал университету мощный импульс дальнейшего развития. За эти годы были введены в эксплуатацию научно-производственный и спортивный комплексы, построен дом для преподавателей, созданы диссертационные советы, журнал «Транспорт Урала», факультет экономики и управления, открыты новые специальности для студентов, вырос профессиональный уровень научно-педагогического состава, УрГУПС стал крупным университетским центром с развитой инфраструктурой и социальной сферой.

В Александре Васильевиче всегда восхищали невероятная сила духа, жизнерадость, повышенное чувство ответственности, профессионализм, самоотверженная преданность науке, широкая эрудиция, интеллигентность, уважительное отношение к людям. Он был очень светлым, отзывчивым, искренним, благородным человеком. Он многим помог, многих воспитал, многих научил и никогда не забывал тех, кто в свое время учил, воспитывал и поддерживал его.

Всем нам, кто был знаком, общался, дружил, работал с Александром Васильевичем, он остался дорог, и мы храним о нем добрую и благодарную память.

TRANSPORT

SCIENTIFIC JOURNAL OF THE URALS

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. Смолянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
12. Туранов Хабибулла Туранович, д-р техн. наук, профессор, Ташкент
13. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
14. 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. Turanov Khabibulla Turanovich, DSc, professor, Tashkent
13. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
14. Sharoglazov Boris Alexandrovich, DSc in Engineering, professor, Chelyabinsk





ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, А. В. Сладковский.

Ранжирование инструментов зеленой логистики
комбинированным методом fuzzy AHP-TOPSIS 3

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

Н. Ф. Сириня, О. А. Сисина. Имитационное моделирование информа-
ционного обмена для случая возникших чрезвычайных ситуаций
во время перевозочного процесса на железнодорожном транспорте 15

Х. Т. Турнов, Я. О. Рузметов, О. В. Молчанова, Ж. А. Шихназаров.

О креплении груза на вагоне при воздействии поперечных сил 23

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

О. И. Бондаренко, Д. Я. Антипин, С. Г. Шорохов.

Оценка уровня травмирования пассажиров вагонов

в аварийных ситуациях при взаимодействии с багажом 30

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

Г. А. Черезов, Р. З. Галинуров, К. В. Колесниченко.

О возможности применения методов обработки сигналов

в системе технического диагностирования СТД-МПК 35

А. Н. Попов, С. Ю. Гришаев.

Безопасность движения при остановке автотранспорта

на железнодорожных переездах перед приближающимся поездом 39

А. В. Пулытьяков, Р. В. Лихота, В. А. Алексеенко. Управление инцидентами

в системе технической эксплуатации микропроцессорных устройств

железнодорожной автоматики и телемеханики 43

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

В. Ю. Лиференко. Об отдельных причинах

возникновения вибрации в пассажирских вагонах 48

В. А. Ханис, С. В. Беспалько, А. Л. Ханис, А. А. Ханис. Методика оценки

вероятности возникновения пожаров на основе мониторинга

пожароопасных состояний электрооборудования пассажирских вагонов 54

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

Е. С. Воеводин, К. В. Бакланова, Н. В. Шадрин, А. М. Асхабов, А. С. Поляков.

Аудит безопасности дорожного движения

на федеральных трассах Красноярского края 57

ТРАНСПОРТНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

А. П. Буйносов, И. А. Иванов, Д. П. Кононов, С. В. Урушев. Некоторые

асpekты назначения параметров структуры поверхности деталей машин 63

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

Н. Н. Андрюсов, И. С. Цихалевский, К. А. Вахрушев.

Анализ возможности применения асинхронных

тяговых электродвигателей с различным числом фаз 70

Б. А. Аржаников, В. А. Кокшаров. Концептуальный подход

к проблеме обоснования экономической эффективности

трехфазной системы электрической тяги переменного тока 74

Е. А. Сидорова, С. О. Подгорная.

Определение основного удельного сопротивления

движению поезда при анализе энергопотребления электровозами 80

А. А. Бакланов, С. Г. Истомин. Эффективность использования

электрической энергии на тягу электропоездов ЭД4М 85

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

А. Б. Батрашов, Н. В. Гущина. Применение численного моделирования

для оценки электротепловых режимов работы элементов

контактной сети постоянного тока 90

С. А. Филиппов, Р. С. Трифонов, О. А. Соловьёва.

Факторный анализ работы дистанционной защиты фидеров

контактной сети в условиях организации тяжеловесного движения 94

Е. К. Хусаинов, Ю. В. Кондратьев. Эффективность дистанционной

защиты контактной сети постоянного тока с функцией адаптации

к тяговому режиму 100

В. Л. Незеявак, С. С. Самолинов. Применение накопителей электроэнергии

в системе тягового электроснабжения с целью повышения пропускной

способности на лимитирующих участках 104

АСПИРАНТСКАЯ ТЕТРАДЬ

А. А. Пазуха. Влияние периодов суток на безопасность труда

при обслуживании и ремонте устройств контактной сети 110

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

N. A. Osintsev, A. N. Rakhmangulov, A. V. Sladkowski.

A fuzzy AHP-TOPSIS approach for green logistics
instruments ranking 3

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

N. F. Sirina, O. A. Sisina. Simulation modeling of information exchange
for the case of emergency situations during
the transportation process on the railway transport 15Kh. T. Turanov, Ya. O. Ruzmetov, O. V. Molchanova, Zh. A. Shikhnazarov.
On fastening of freight in cars at action of transverse forces 23

ROLLING STOCK AND TRACTION

O. I. Bondarenko, D. Ya. Antipin, S. G. Shorokhov.

Assessment of passenger injuries level in emergency situations
at interaction with baggage 30

AUTOMATION, TELEMECHANICS AND COMMUNICATION

G. A. Cherezov, R. Z. Galinurov, K. V. Kolesnichenko.

Application of signal processing methods
in the STD-MPK technical diagnostic system 35

A. N. Popov, S. Yu. Grishaev.

Safety of operation when motor vehicles stop
at railway crossings in front of approaching train 39

A. V. Pulyatkov, R. V. Likhota, V. A. Alekseenko.

Incident management in system of technical operation
of microprocessor devices of railway automation and telemechanics 43

RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

V. Yu. Liferenko.

On separate reasons of vibration occurrence in passenger cars 48

V. A. Khanis, S. V. Bespal'ko, A. L. Khanis, A. A. Khanis.

Method for assessing fire risk on the basis of monitoring
of fire-hazardous conditions of passenger cars electric equipment 54

MOTOR TRANSPORT

E. S. Voevodin, K. V. Baklanova, N. V. Shadrin,

A. M. Askhakov, A. S. Polyakov.

Audit of road traffic safety on federal roads of Krasnoyarsk Territory 57

TRANSPORT MACHINERY

A. P. Buynosov, I. A. Ivanov, D. P. Kononov, S. V. Urushev.

Some aspects of assigning parameters of machine parts surface structure 63

ELECTRIC TRACTION

N. N. Androsov, I. S. Tsikhalevskiy, K. A. Vakhrushev.

Analysis of possibility of application of induction motors
with various number of phases 70

B. A. Arzhannikov, V. A. Koksharov.

Conceptual approach to problem of economic efficiency substantiation
of three-phase alternating current system of electric traction 74

E. A. Sidorova, S. O. Podgornaya.

Determination of basic specific train tractive resistance
at analysis of power consumption of electric locomotives 80

A. A. Baklanov, S. G. Istomin. Efficiency of using electric power

for traction of ED4M electric multiple units 85

ELECTRIC SUPPLY

A. B. Batrashov, N. V. Gushchina. Application of numerical modelling

for assessing electric and thermal operation modes
of direct current catenary elements 90

S. A. Filippov, R. S. Trifonov, O. A. Solovyeva.

Factor analysis of operation of catenary feeders' distance protection
in conditions of heavy-load trains operation 94

E. K. Khusainov, Yu. V. Kondrat'yev.

Efficiency of direct current catenary distance protection
with adaptation to traction mode 100V. L. Nezevak, S. S. Samolinov. Application of electric power accumulators in traction power supply
system in order to increase capacity on «bottleneck» sections 104

RESEARCH OF YOUNG SCIENTISTS

A. A. Pazukha. Influence of day period on labour safety

at maintenance and repair of catenary facilities 110

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

Александр Нельевич Рахмангулов, доктор технических наук, профессор кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова (МГТУ), Магнитогорск, Россия,

Александр Валентинович Сладковский, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Логистика и транспортные технологии» Сileszского технического университета, Катовице, Польша

РАНЖИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ЗЕЛЕНОЙ ЛОГИСТИКИ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ FUZZY AHP-TOPSIS

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

Alexander Nelyevich Rakhmangulov, DSc in Engineering, Professor, Department of Logistics and Transportation Systems Management, Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU), Magnitogorsk, Russia,

Alexander Valentinovich Sladkowski, DSc in Engineering, Professor, Head of the Department of Logistics and Transport Technologies, Faculty of Transport, Silesian University of Technology, Katowice, Poland

A fuzzy AHP-TOPSIS approach for green logistics instruments ranking

Аннотация

Эффективная реализация концепции устойчивого развития в логистической деятельности и управлении цепями поставок основана на использовании методов принятия управленческих решений по изменению параметров логистических потоков с использованием инструментов зеленой логистики. Решения должны приниматься на основе измерения и оценки параметров и показателей этих потоков. Сложность управления зелеными цепями поставок связана с недостаточной изученностью системы показателей и параметров логистических потоков, отсутствием методик их комплексной оценки, а также методов и инструментов влияния на эти параметры и показатели. В статье предложено использование комбинированного метода fuzzy AHP-TOPSIS для оценки показателей логистических потоков в зеленых цепях поставок, а также для ранжирования инструментов зеленой логистики с учетом степени влияния каждого из них на рассматриваемые параметры и показатели. Представлен расчетный пример ранжирования инструментов зеленой логистики на основе оценки параметров и показателей логистических потоков в цепях поставок.

Ключевые слова: логистическая система, зеленая логистика, цепь поставок, транспортная система, показатели, методы принятия решений, ранжирование, нечеткий AHP-TOPSIS метод.

Summary

The effective concept implementation of sustainable development in logistics and supply chain management is based on the use of management decision-making methods for changing the parameters of logistics flows using the green logistics instruments. Decisions should be made based on the measurement and evaluation of the indicators of these flows.

The complexity of managing green supply chains is associated with insufficient knowledge of the system of logistics flows indicators and parameters, as well as methods and instruments for influencing these indicators.

In the paper the use of the fuzzy AHP-TOPSIS method for evaluating the performance of logistics flows in green supply chains is considered, as well as ranking of green logistics instruments, taking into account the degree of influence on logistics flows indicators. The work presents a calculation implementation example in the logistics flow control system of the procedure for ranking green logistic instruments.

Keywords: logistics system, green logistics, supply chain, transport system, decisions making, ranking, indicators, fuzzy AHP-TOPSIS.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-3-14

ВВЕДЕНИЕ

Развитие международной торговли в условиях глобализации приводит к росту объемов мирового товарооборота, расширению и усложнению товарной номенклатуры. Мировой экспорт коммерческих услуг и мировой экспорт товаров за последние 20 лет увеличился соответственно с 1,18 до 4,87 и с 5,17 до 19 млрд долл. США [1]. Рост глобального рынка логистических услуг с 2016 г. составляет 3,48 % в год и по оценкам [2] к 2022 г. может превысить 12 млрд долл. Подобная положительная динамика показателей международной торговли делает актуальной задачу развития транспортных и логистических систем, способных обслуживать возрастающие объемы перевозок максимально эффективно. Решение этой задачи осложняется повышением требований к экологическим аспектам транспортно-логистической деятельности, а также необходимостью обеспечивать соответствие формируемым транспортным коридоров и международных цепей поставок целям концепции устойчивого развития [3].

Многие транспортные и логистические компании [4] в своей деятельности реализуют принципы [5, 6] и инструменты зеленой логистики [7], рассматривая их как основу эффективного управления технологическими процессами, ресурсными и энергетическими потоками для снижения экологического ущерба окружающей среде, решения социальных вопросов



и эффективного инновационного развития производства. Вместе с тем в мировой практике управления зелеными цепями поставок до сих пор идет накопление и отбор частных решений по снижению отрицательного влияния логистики и транспорта на окружающую среду. Такие решения находят отражение в различных зеленых программах, стратегиях, проектах [4]. Логистические компании и транспортные предприятия сталкиваются с проблемой выбора той или иной зеленой технологии, обоснования ее использования для реализации в своей практической деятельности. Это делает актуальной задачу обоснования подходов и методов принятия решений, позволяющих оценить и выбрать зеленые технологии, реализация которых обеспечит повышение эффективности логистических и транспортных систем при минимальном вредном воздействии на окружающую среду.

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В настоящее время для сложных многофакторных и многокритериальных задач формирования зеленых цепей поставок и управления ими широко используются многокритериальные подходы к принятию решений (Multi-Criteria Decision Making — MCDM). Они могут применяться при количественной оценке компромиссов между экономическими, социальными и экологическими критериями устойчивого развития цепей поставок [8]. Необходимость использования этих методов обусловлена многообразием характеристик и свойств логистических систем, их элементов [9], а также множеством параметров и показателей оценки их функционирования [10].

В научной литературе MCDM разделены на две категории: малый и конечный набор решений, называемый многофакторным принятием решений (Multi-Attribute Decision Making — MADM), и большой и бесконечный набор альтернатив, называемый многоцелевым принятием решений (Multi-Objective Decision Making — MODM) или многоцелевым программированием (Multi-Objective Programming — MOP). Методы MADM направлены на выявление наилучшего варианта на основе известных атрибутов ограниченного числа альтернатив, в то время как MODM направлены на поиск наилучшего решения, удовлетворяющего желанию лица, принимающего решение.

Многообразие параметров, свойств и характеристик логистических потоков в цепях поставок ставит задачу использования MCDM совместно с различными нечеткими подходами и методами. Это обосновано необходимостью учета множества факторов, обусловленных спецификой функционирования транспортных систем и цепей поставок, а также многообразием параметров потоков, циркулирующих в рамках логистической системы, оценка которых может выполняться и на основе точных количественных показателей, и с использованием приближенных качественных оценок.

Анализ научной литературы показывает, что в практике управления зелеными цепями поставок авторы применяют различные нечеткие подходы и методы, в частности fuzzy Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) [11–15], fuzzy Importance and Performance Analysis (FIPA) [16], fuzzy Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) [17, 18], fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) [13, 19–22], fuzzy Analytic Network Process (ANP) [14, 23], fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP) [20, 24, 25], fuzzy Grey Relational Analysis (GRA) [20], Interpretive Structural Modeling (ISM) [22, 26], нечеткую теорию игр [27, 28] и др. Перечисленные нечеткие методы используются при оценке и выборе поставщиков, планировании и проектировании сети цепей поставок, для анализа факторов зеленого производства, повышения экономических и экологических показателей цепи поставок, выбора стратегии развития зеленых цепей поставок, оценки затрат на зеленую логистику, минимизации выбросов в окружающую среду.

Solution (TOPSIS) [13, 19–22], fuzzy Analytic Network Process (ANP) [14, 23], fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP) [20, 24, 25], fuzzy Grey Relational Analysis (GRA) [20], Interpretive Structural Modeling (ISM) [22, 26], нечеткую теорию игр [27, 28] и др. Перечисленные нечеткие методы используются при оценке и выборе поставщиков, планировании и проектировании сети цепей поставок, для анализа факторов зеленого производства, повышения экономических и экологических показателей цепи поставок, оценки затрат на зеленую логистику, минимизации выбросов в окружающую среду.

Недостатки большинства существующих подходов состоят в отсутствии комплексного и системного подхода к оценке всех логистических потоков, недостаточном учете взаимосвязей между показателями и параметрами потоков с позиции концепции устойчивого развития. Поэтому разработка методов и методик оценки параметров и показателей логистических потоков для выбора инструментов обеспечения функционирования транспортных систем и цепей поставок в соответствии с целями устойчивого развития представляет собой актуальную научную проблему.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ FUZZY AHP-TOPSIS В УПРАВЛЕНИИ ЗЕЛЕНЫМИ ЦЕПЯМИ ПОСТАВОК

В настоящем исследовании предлагается применять комбинированный нечеткий метод AHP-TOPSIS для оценки параметров и показателей логистических потоков в зеленых цепях поставок с целью определения приоритетов использования инструментов зеленой логистики.

Впервые подход fuzzy AHP с использованием треугольных нечетких чисел и метода анализа экстентов описан в работе [29]. Позднее применение fuzzy AHP было обосновано для решения проблем устойчивого развития транспортных систем [19, 30], управления цепями поставок [31, 32], в области реверсивной логистики [24]. Использование fuzzy AHP, в отличие от метода анализа иерархии (AHP), предложенного Tomas L. Saaty [33], позволяет не только исключить такие недостатки, как несбалансированность шкалы суждений, неопределенность и субъективность суждения экспертов [34, 35], но и повысить точность ранжирования.

Для оценки степени влияния инструментов зеленой логистики на параметры и показатели логистических потоков и ранжирования инструментов между собой предлагается использовать нечеткий метод определения порядкового номера (или ранга) близости к идеальному решению fuzzy TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution).

TOPSIS относится к мультикритериальным методам принятия решений и основан на выборе такой альтернативы, которая наиболее близка к положительному идеальному решению и наиболее далека от отрицательного идеального решения. Впервые использование метода TOPSIS было предложено в работе [36] для выбора лучших альтернатив с конечным числом критериев. В [37, 38] сделан обзор применения метода TOPSIS в различных областях, среди которых наибольшая доля приходится на управление цепями поставок и логистику, инжиниринг и производственные системы. В ряде работ

[25, 32, 39, 40] обосновано использование fuzzy TOPSIS для многокритериальных задач принятия решений в нечеткой среде и для управления с неопределенностью в суждениях и оценках лиц, принимающих решения.

Комбинация методов AHP-TOPSIS позволяет повысить качество оценок лицами, принимающими решения, при выборе и реализации инструментов зеленой логистики. Метод fuzzy AHP используется для определения веса параметров и показателей логистических потоков, а fuzzy TOPSIS для ранжирования инструментов зеленой логистики с учетом степени влияния каждого инструмента на эти параметры и показатели.

2.1. Метод нечеткой аналитической иерархии — fuzzy AHP

Для использования fuzzy AHP необходимо представить систему параметров и показателей логистических потоков в виде многоуровневой иерархической модели. В качестве компонентов первого уровня иерархии выступают группы параметров логистических потоков, соответствующие основным аспектам концепции устойчивого развития. Компоненты второго уровня иерархии — это 15 показателей [10] оценки логистических потоков (табл. 1).

В качестве функции принадлежности предлагается использование треугольной функции, которая задается условиями

$$\mu_M(x) = \begin{cases} 0,0 \leq x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, b \leq x \leq c; \\ 0, c \leq x, \end{cases} \quad (1)$$

где a — левый ноль;

b — точка, в которой значение функции принадлежности равно 1;

c — правый ноль (рис. 1).

На основе обобщения исследований [19, 32, 40] в настоящей работе приняты лингвистические переменные и треугольные нечеткие числа для оценки параметров и показателей логистических потоков (табл. 2).

Построение матриц парного сравнения $\tilde{A}(\tilde{u}_{ij})$ выполняется для всех параметров и показателей логистических пото-

Таблица 1

Система параметров и показателей оценки логистических потоков

Группа параметров потока (I уровень иерархии)		Показатели потока (II уровень иерархии)	
Группа экономических параметров потока	E	Прибыль	$E1$
		Операционные расходы	$E2$
		Инвестиции в основной капитал	$E3$
Группа энергоэкологических показателей	EE	Энергоемкость логистического потока	$EE1$
		Объем выбросов парниковых газов	$EE2$
Группа показателей качества	S	Сохранность перевозки грузов	$S1$
		Своевременность перевозки грузов	$S2$
		Коэффициент управляемости логистического потока	$S3$
Группа статистических индикаторов	ST	Коэффициент неравномерности логистического потока	$ST1$
		Коэффициент сложности структуры логистического потока	$ST2$
		Коэффициент дискретности логистического потока	$ST3$
		Коэффициент дифференцируемости логистического потока	$ST4$
Группа управляемых (физических) параметров потока	M	Масса логистического потока	$M1$
		Скорость логистического потока	$M2$
		Длина маршрута логистического потока	$M3$

Таблица 2

Нечеткие и лингвистические переменные оценки параметров и показателей логистических потоков

Нечеткое число	Лингвистическая переменная	Шкала нечетких чисел
1	Равная важность	(1,1,3)
2	Умеренное превосходство	(1,3,5)
3	Значительное превосходство	(3,5,7)
4	Сильное превосходство	(5,7,9)
5	Абсолютное превосходство	(7,9,10)

ков с целью определения относительной важности каждой пары параметров (показателей) между собой:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{u}_{12} & \dots & \tilde{u}_{1n} \\ \tilde{u}_{21} & 1 & \dots & \tilde{u}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{u}_{(n-1)1} & \tilde{u}_{(n-1)2} & \dots & \tilde{u}_{(n-1)n} \\ \tilde{u}_{n2} & \tilde{u}_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{u}_{12} & \dots & \tilde{u}_{1n} \\ 1/\tilde{u}_{12} & 1 & \dots & \tilde{u}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/\tilde{u}_{1(n-1)} & 1/\tilde{u}_{2(n-1)} & \dots & \tilde{u}_{(n-1)n} \\ 1/\tilde{u}_{1n} & 1/\tilde{u}_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

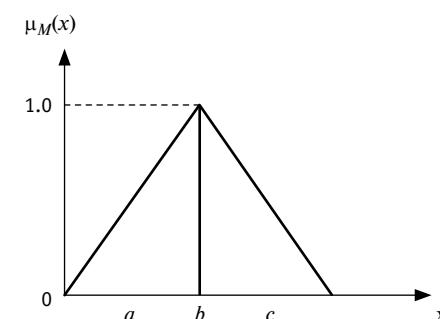


Рис. 1. Треугольная функция принадлежности

Матрица суждений \tilde{A} является нечеткой матрицей $n \times n$, содержащей нечеткие числа \tilde{u}_{ij} :

$$\tilde{u}_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j; \\ 9^{-1}, 8^{-1}, 7^{-1}, 6^{-1}, 5^{-1}, 4^{-1}, 3^{-1}, 2^{-1}, 1^{-1}, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, & i \neq j. \end{cases} \quad (3)$$

Значение нечеткой синтетической степени (экстента) S_i относительно i -го критерия определяется как

$$S_i = \sum_{j=1}^m \tilde{u}_{ij} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \tilde{u}_{ij} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где

$$\sum_{j=1}^m \tilde{u}_{ij} = \left(\sum_{j=1}^m a_j, \sum_{j=1}^m b_j, \sum_{j=1}^m c_j \right); \quad (5)$$

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \tilde{u}_{ij} \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n c_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n b_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_i} \right). \quad (6)$$

Для оценки веса векторов по каждому критерию необходимо рассмотреть принцип сравнения нечетких чисел, основанный на пересечении двух нечетких чисел (рис. 2). В результате такого пересечения определяется величина V .

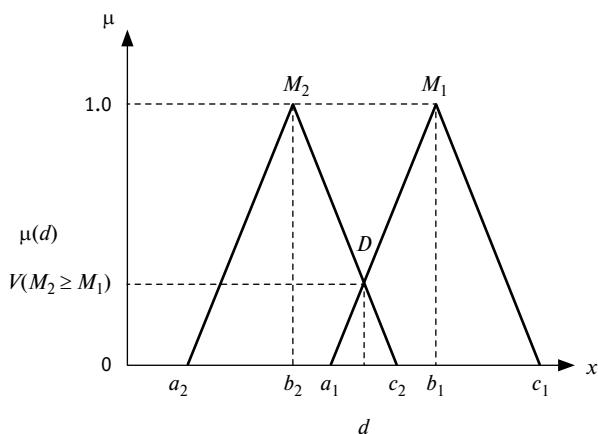


Рис. 2. Схема пересечения двух нечетких чисел M_1 и M_2

Мера возможности $M_2 = (a_2, b_2, c_2) > M_1 = (a_1, b_1, c_1)$ определяется следующим образом:

$$V(M_2 \geq M_1) = \sup \left[\min(\mu_{M1(x)}, \mu_{M2(y)}) \right] = hgt(M_1 \cap M_2) = \mu_{M2(d)}; \quad (7)$$

$$\mu_M(d) = \begin{cases} 1, & \text{если } b_2 \geq b_1; \\ 0, & \text{если } a_1 \geq c_2; \\ \frac{a_1 - c_2}{(b_2 - c_2) - (b_1 - a_1)}, & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (8)$$

где d — ордината самой высокой точки пересечения D между $\mu_{M1(x)}$ и $\mu_{M2(y)}$.

Мера возможности для выпуклого нечеткого числа больше чем k выпуклых нечетких чисел $M_i (i = 1, 2, 3, \dots, k)$ и рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) &= \\ &= V[(M \geq M_1), \dots, (M \geq M_k)] = \\ &= \min V(M \geq M_i), i = 1, 2, \dots, k. \end{aligned} \quad (9)$$

Величина $d'(A_i)$ рассчитывается по формуле

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k), \text{ для } k = 1, 2, \dots, n; k \neq i. \quad (10)$$

Тогда вектор приоритетов определится как

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T, \quad (11)$$

где $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$ — вектор оцениваемых параметров, состоящий из n элементов.

С помощью нормализации получаем нормализованные весовые векторы

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T, \quad (12)$$

где W — нечеткое число.

Таким образом, в результате применения метода fuzzy АНР получены значения веса (ранга) параметров и показателей логистических потоков в цепях поставок.

2.2. Нечеткий метод ранжирования решений по критерию близости к идеальному — fuzzy TOPSIS

Для ранжирования инструментов зеленой логистики по степени их влияния на параметры и показатели логистических потоков в цепях поставок предлагается использовать метод fuzzy TOPSIS. В общем виде реализация fuzzy TOPSIS включает в себя следующие этапы.

1. Присвоение рейтинга критериям и альтернативам. Предположим, что существует m возможных альтернатив, называемых $I = \{I_1, I_2, I_3, \dots, I_m\}$, оценка которых выполняется по критериям $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_n\}$ группой из k лиц, принимающих решения, $D = \{D_1, D_2, D_3, \dots, D_k\}$:

$$D = I_2 \begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где r_{mn} — рейтинг альтернатив I_m по критерию C_n , выставленный k -м лицом, принимающим решение.

В качестве альтернатив в настоящем исследовании выступают инструменты зеленой логистики [4, 7] (табл. 3).



Таблица 3

Инструменты зеленой логистики
(на примере транспортного логистического элемента [7])

Инструмент	Обозначение
Использование экологичных видов транспорта	I_1
Использование интермодальных технологий и смешанных перевозок	I_2
Использование транспортных средств с наименьшим воздействием на окружающую среду	I_3
Выбор транспортных средств с большой грузоподъемностью (грузовместимостью)	I_4
Использование экологичных горючесмазочных материалов (видов топлива)	I_5
Обеспечение технологического единства транспортно-складского процесса	I_6
Оптимизация маршрутов движения транспортных средств	I_7
Оптимизация скорости движения транспортных средств	I_8
Экологождение	I_9
Консолидация грузопотоков по направлениям	I_{10}
Оптимизация структуры грузопотоков	I_{11}
Оперативное управление параметрами материальных потоков	I_{12}

2. Расчет совокупной нечеткой оценки для критериев и альтернатив. Если нечеткие оценки всех лиц, принимающих решения, описываются треугольными нечеткими числами (табл. 4), то оценка каждого критерия рассчитывается по формулам:

$$a_{mnk} = \min_k \{a_{mnk}\}; b_{mnk} = \frac{1}{K} \sum_k b_{mnk}; c_{mnk} = \max_k \{c_{mnk}\}. \quad (14)$$

Таблица 4

Нечеткие числа и лингвистические переменные
для оценки инструментов зеленой логистики

Нечеткое число	Лингвистическая переменная	Шкала нечетких чисел
1	Очень слабо	(1,1,3)
2	Слабо	(1,3,5)
3	Удовлетворительно	(3,5,7)
4	Сильно	(5,7,9)
5	Очень сильно	(7,9,10)

3. Нормализация матрицы нечетких решений. Нормализованная матрица нечетких решений имеет вид $R = [r_{ij}]_{m \times n}$, $i = 1, 2, 3, \dots, m$; $j = 1, 2, 3, \dots, n$. Элементы этой матрицы рассчитываются по следующим критериям:

критерий результата $r_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{c_j^+}, \frac{c_{ij}}{c_j^+} \right)$ и $c_j^+ = \max_i \{c_{ij}\}$; (15)

критерий затрат $r_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{c_{ij}} \right)$ и $a_j^- = \min_i \{a_{ij}\}$. (16)

4. Вычисление взвешенной нормализованной матрицы. Взвешенная нормализованная матрица V определяется произведением весов критериев оценки w_j на нормализованную матрицу нечетких решений r_{ij} :

$$\begin{aligned} V &= [v_{ij}]_{m \times n}, i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n, \\ V &= r_{ij} \times w_j, \\ \sum_{i=1}^n w_j &= 1. \end{aligned} \quad (17)$$

5. Вычисление нечеткого положительного идеального решения (Fuzzy Positive Ideal Solution — FPIS) и нечеткого отрицательного идеального решения (Fuzzy Negative Ideal Solution — FNIS):

$$\begin{aligned} A^+ &= (v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+), \\ v_j^+ &= \max_i \{v_{ij}\} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m; \\ j &= 1, 2, 3, \dots, n; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} A^- &= (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-), \\ v_j^- &= \min_i \{v_{ij}\} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m; \\ j &= 1, 2, 3, \dots, n. \end{aligned} \quad (19)$$

6. Расчет расстояния каждой альтернативы от FPIS и FNIS. Расстояние (d_i^+, d_i^-) каждой альтернативы A^+ и A^- определяется по формулам:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m; \quad (20)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (21)$$

7. Вычисление коэффициента близости CC_i каждой альтернативы. Коэффициент близости CC_i представляет собой расстояние до нечеткого положительного идеального решения A^+ и нечеткого отрицательного идеального решения A^- одновременно:

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (22)$$



8. Ранжирование альтернатив. Альтернативы ранжируются в соответствии с коэффициентом близости CC_i в порядке убывания. Лучшая альтернатива — самая близкая к FPIS и самая дальняя от FNIS.

3. ПРИМЕР РАНЖИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ ЗЕЛЕНОЙ ЛОГИСТИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ FUZZY AHP-TOPSIS

На основе литературного обзора и практики реализации инструментов зеленой логистики в управлении цепями поставок были выбраны 12 инструментов (см. табл. 3). Логистические потоки оценивались по 5 группам параметров и 15 показателям в соответствии с аспектами концепции устойчивого развития (см. табл. 1).

В качестве лиц, принимающих решения, выбраны 7 академических экспертов. Ими выполнена оценка параметров и показателей логистических потоков с использованием лингвистических переменных и треугольных нечетких чисел (см. табл. 2 и 4). Итоговые результаты метода fuzzy AHP в виде матриц нечетких агрегированных решений по оценке параметров и показателей логистических потоков с указанием весовых коэффициентов приведены в табл. 5–10.

В табл. 11 представлены результаты расчета значений нечеткой синтетической степени (экстента) групп параметров логистических потоков, выполненного по формулам (4)–(6).

Результаты расчета меры возможности критериев (V -значения) с использованием формул (7)–(8) для групп параметров логистических потоков приведены в табл. 12.

Таблица 5

Матрица нечетких агрегированных решений параметров логистических потоков

Параметр	<i>E</i>	<i>EE</i>	<i>S</i>	<i>ST</i>	<i>M</i>	Вес	Ранг
<i>E</i>	(1, 1, 1)	(1.12, 1.85, 2.69)	(0.19, 0.27, 0.43)	(3.97, 6.20, 8.27)	(0.19, 0.29, 0.46)	0.2538	2
<i>EE</i>	(0.37, 0.54, 0.89)	(1, 1, 1)	(1.37, 2.09, 4.11)	(2.44, 3.51, 5.92)	(0.21, 0.32, 0.58)	0.2219	4
<i>S</i>	(2.17, 3.47, 5.05)	(0.24, 0.43, 0.73)	(1, 1, 1)	(2.17, 2.76, 5.23)	(0.85, 1.26, 2.47)	0.2474	3
<i>ST</i>	(0.12, 0.16, 0.25)	(0.17, 0.28, 0.41)	(0.19, 0.36, 0.46)	(1, 1, 1)	(0.32, 0.39, 0.86)	0.0005	5
<i>M</i>	(2.17, 3.48, 5.05)	(1.72, 3.08, 4.64)	(0.40, 0.79, 1.17)	(1.15, 2.56, 3.11)	(1, 1, 1)	0.2764	1

Таблица 6

Таблица 7

Матрица нечетких агрегированных решений экономических показателей логистических потоков (*E*)

Показатель	<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>	Вес	Ранг
<i>E1</i>	(1, 1, 1)	(2.27, 3.64, 4.96)	(1.58, 2.86, 4.11)	0.7572	1
<i>E2</i>	(0.20, 0.27, 0.44)	(1, 1, 1)	(0.43, 0.69, 1.16)	0.0151	3
<i>E3</i>	(0.24, 0.35, 0.63)	(0.86, 1.46, 2.30)	(1, 1, 1)	0.2277	2

Матрица нечетких агрегированных решений энергозэкологических показателей логистических потоков (*EE*)

Показатель	<i>EE1</i>	<i>EE2</i>	Вес	Ранг
<i>EE1</i>	(1, 1, 1)	(1.87, 3.31, 5.24)	0.9862	1
<i>EE2</i>	(0.19, 0.30, 0.53)	(1, 1, 1)	0.0138	2

Таблица 8

Матрица нечетких агрегированных решений показателей качества логистических потоков (*S*)

Показатель	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	Вес	Ранг
<i>S1</i>	(1, 1, 1)	(1.27, 1.70, 2.30)	(0.85, 1.72, 2.86)	0.4478	1
<i>S2</i>	(0.43, 0.59, 0.79)	(1, 1, 1)	(0.72, 1.40, 2.09)	0.0349	3
<i>S3</i>	(0.35, 0.58, 1.17)	(0.48, 0.71, 1.39)	(1, 1, 1)	0.2473	2

Таблица 9

Матрица нечетких агрегированных решений статистических показателей логистических потоков (*ST*)

Показатель	<i>ST1</i>	<i>ST2</i>	<i>ST3</i>	<i>ST4</i>	Вес	Ранг
<i>ST1</i>	(1, 1, 1)	(1.47, 2.02, 2.43)	(1.04, 1.72, 2.36)	(1.26, 1.81, 2.17)	0.4116	1
<i>ST2</i>	(0.41, 0.49, 0.68)	(1, 1, 1)	(0.87, 1.54, 2.45)	(1.37, 2.17, 2.76)	0.3290	2
<i>ST3</i>	(0.42, 0.58, 0.96)	(0.41, 0.65, 1.13)	(1, 1, 1)	(0.96, 1.17, 1.51)	0.1747	3
<i>ST4</i>	(0.46, 0.55, 0.79)	(0.36, 0.46, 0.73)	(0.66, 0.85, 1.04)	(1, 1, 1)	0.0846	4



Таблица 10

Матрица нечетких агрегированных решений управляемых параметров логистических потоков (M)

Параметр	$M1$	$M2$	$M3$	Вес	Ранг
$M1$	(1, 1, 1)	(0.95, 1.29, 1.90)	(1.70, 2.57, 3.96)	0.4507	2
$M2$	(0.53, 0.78, 1.05)	(1, 1, 1)	(2.36, 4.53, 6.59)	0.5447	1
$M3$	(0.25, 0.39, 0.59)	(0.15, 0.22, 0.42)	(1, 1, 1)	0.0046	3

Таблица 11

Результаты расчета значения нечеткой синтетической степени (экстента)

Параметр	$\sum_{j=1}^m \tilde{u}_{ij} = \left(\sum_{j=1}^m a_j, \sum_{j=1}^m b_j, \sum_{j=1}^m c_j \right)$	$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \tilde{u}_{ij} \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n c_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n b_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_i} \right)$	S_i
E	(6.4773, 9.6169, 12.8589)	(1/57.8058, 1/39.1306, 1/26.5671)	(0.11205, 0.24576, 0.48402)
EE	(5.4023, 7.4697, 12.5095)	(1/57.8058, 1/39.1306, 1/26.5671)	(0.09346, 0.19089, 0.47086)
S	(6.4337, 8.9299, 14.4818)	(1/57.8058, 1/39.1306, 1/26.5671)	(0.1113, 0.22821, 0.5451)
ST	(1.8021, 2.1975, 2.9859)	(1/57.8058, 1/39.1306, 1/26.5671)	(0.03118, 0.05616, 0.11239)
M	(6.4518, 10.9166, 14.9697)	(1/57.8058, 1/39.1306, 1/26.5671)	(0.11161, 0.27898, 0.56347)

Таблица 12

Мера возможности для каждого параметра вычисляется по формуле (9)

Результаты расчета меры возможности критерии (V -значения)

Параметр	E	EE	S	ST	M
E	—	1	1	1	0.91811
EE	0.86736	—	0.90598	1	0.80309
S	0.96104	1	—	1	0.89516
ST	0.00177	0.12322	0.00631	—	0.00349
M	1	1	1	1	—

Таблица 13

Ранжирование параметров и показателей логистических потоков

Группы параметров логистических потоков	Вес	Показатели логистических потоков	Вес	Финальный вес	Финальный ранг
Группа экономических параметров (E)	0.2538	$E1$	0.75726	0.19216	2
		$E2$	0.01508	0.00383	9
		$E3$	0.22766	0.05777	8
Группа энергоэкологических показателей (EE)	0.2220	$EE1$	0.98622	0.21890	1
		$EE2$	0.01378	0.00306	10
Группа показателей качества (S)	0.2474	$S1$	0.44784	0.11080	5
		$S2$	0.30491	0.07544	6
		$S3$	0.24725	0.06117	7
Группа статистических индикаторов (ST)	0.0005	$ST1$	0.41160	0.00020	12
		$ST2$	0.32903	0.00016	13
		$ST3$	0.17474	0.00009	14
		$ST4$	0.08463	0.00004	15
Группа физических параметров (M)	0.2764	$M1$	0.45068	0.12456	4
		$M2$	0.54476	0.15056	3
		$M3$	0.00456	0.00126	11

$$d'(E) = \min V(S_i = S_k) = \\ = \min(1, 1, 1, 0.91811) = 0.91811.$$

Для других параметров значения равны $d'(EE) = 0.80309$, $d'(S) = 0.89516$, $d'(ST) = 0.00349$, $d'(M) = 1$.Весовой вектор каждого критерия $W' = 0.9181, 0.8030, 0.8951, 0.0017, 1$.Посредством нормализации конечный вектор веса $W = 0.25375, 0.22196, 0.24741, 0.00049, 0.27639$.

Аналогичные расчеты выполняются для каждой группы параметров логистических потоков. Окончательные результаты расчета весовых коэффициентов параметров и показателей логистических потоков приведены в табл. 13.

Для ранжирования инструментов зеленой логистики методом fuzzy TOPSIS выполнена экспертиза оценка этих инструментов с использованием треугольных нечетких чисел (см. табл. 2).

При расчете совокупной матрицы нечетких решений используется формула (14). Результаты расчета совокупной нечеткой оценки для показателей логистических потоков и инструментов зеленой логистики приведены в табл. 14.



Таблица 14

Матрица нечетких агрегированных решений инструментов зеленой логистики

Инструменты зеленой логистики	Показатели логистических потоков						
	E1	E2	E3	...	M1	M2	M3
I_1	(3, 5.67, 9)	(5, 7.67, 10)	(5, 8.33, 10)	...	(1, 5, 9)	(1, 5, 9)	(3, 5.67, 9)
I_2	(5, 7.67, 10)	(3, 6.33, 10)	(5, 7, 9)	...	(1, 4.33, 9)	(3, 6.33, 9)	(3, 7, 10)
I_3	(1, 4.33, 9)	(1, 5.67, 9)	(3, 6.33, 10)	...	(1, 3.66, 7)	(1, 3.67, 7)	(1, 3.67, 7)
I_4	(3, 5.67, 9)	(3, 7, 10)	(1, 6.33, 10)	...	(5, 7, 9)	(1, 3.67, 9)	(1, 1.67, 5)
I_5	(3, 5.67, 9)	(3, 6.33, 9)	(1, 3, 7)	...	(1, 1, 3)	(1, 2.33, 5)	(1, 1, 3)
I_6	(1, 5.67, 10)	(3, 7, 10)	(1, 5, 9)	...	(1, 3.67, 9)	(1, 5, 9)	(1, 3.67, 7)
I_7	(1, 5, 9)	(3, 5.67, 9)	(1, 3, 7)	...	(1, 2.33, 7)	(1, 5, 9)	(1, 5.67, 10)
I_8	(1, 5, 10)	(1, 5, 9)	(1, 1.67, 5)	...	(1, 2.33, 5)	(7, 9, 10)	(1, 3, 7)
I_9	(1, 2.33, 5)	(1, 3.67, 7)	(1, 1, 3)	...	(1, 1.67, 5)	(1, 5, 9)	(1, 2.33, 7)
I_{10}	(1, 4.33, 7)	(1, 5.67, 9)	(1, 1.67, 5)	...	(5, 7.66, 10)	(1, 5, 9)	(1, 5.67, 9)
I_{11}	(1, 5.67, 9)	(1, 5, 9)	(1, 2.33, 5)	...	(3, 5, 7)	(1, 6.33, 10)	(1, 3.67, 7)
I_{12}	(1, 4.33, 9)	(1, 5, 9)	(1, 2.33, 5)	...	(1, 5, 9)	(3, 6.33, 9)	(3, 5.67, 9)

Таблица 15

Нормализованная матрица нечетких решений инструментов зеленой логистики

Инструменты зеленой логистики	Показатели логистических потоков						
	E1	E2	E3	...	M1	M2	M3
I_1	(0.3, 0.567, 0.9)	(0.2, 0.130, 0.1)	(0.5, 0.833, 1)	...	(0.1, 0.5, 0.9)	(0.1, 0.5, 0.9)	(0.333, 0.177, 0.111)
I_2	(0.5, 0.767, 1)	(0.333, 0.158, 0.1)	(0.5, 0.7, 0.9)	...	(0.1, 0.433, 0.9)	(0.3, 0.633, 0.9)	(0.333, 0.143, 0.1)
I_3	(0.1, 0.433, 0.9)	(1, 0.177, 0.111)	(0.3, 0.633, 1)	...	(0.1, 0.367, 0.7)	(0.1, 0.367, 0.7)	(1, 0.273, 0.143)
I_4	(0.3, 0.567, 0.9)	(0.333, 0.143, 0.1)	(0.1, 0.633, 1)	...	(0.5, 0.7, 0.9)	(0.1, 0.367, 0.9)	(1, 0.6, 0.2)
I_5	(0.3, 0.567, 0.9)	(0.333, 0.158, 0.111)	(0.1, 0.3, 0.7)	...	(0.1, 0.1, 0.3)	(0.1, 0.233, 0.5)	(1, 1, 0.333)
I_6	(0.1, 0.567, 1)	(0.333, 0.143, 0.1)	(0.1, 0.5, 0.9)	...	(0.1, 0.367, 0.9)	(0.1, 0.5, 0.9)	(1, 0.273, 0.143)
I_7	(0.1, 0.5, 0.9)	(0.333, 0.176, 0.111)	(0.1, 0.3, 0.7)	...	(0.1, 0.233, 0.7)	(0.1, 0.5, 0.9)	(1, 0.177, 0.1)
I_8	(0.1, 0.5, 1)	(1, 0.2, 0.111)	(0.1, 0.167, 0.5)	...	(0.1, 0.233, 0.5)	(0.7, 0.9, 1)	(1, 0.333, 0.143)
I_9	(0.1, 0.233, 0.5)	(1, 0.273, 0.143)	(0.1, 0.1, 0.3)	...	(0.1, 0.167, 0.5)	(0.1, 0.5, 0.9)	(1, 0.429, 0.143)
I_{10}	(0.1, 0.433, 0.7)	(1, 0.176, 0.111)	(0.1, 0.167, 0.5)	...	(0.5, 0.767, 1)	(0.1, 0.5, 0.9)	(1, 0.177, 0.111)
I_{11}	(0.1, 0.567, 0.9)	(1, 0.2, 0.111)	(0.1, 0.233, 0.5)	...	(0.3, 0.5, 0.7)	(0.1, 0.633, 1)	(1, 0.273, 0.143)
I_{12}	(0.1, 0.433, 0.9)	(1, 0.2, 0.111)	(0.1, 0.233, 0.5)	...	(0.1, 0.5, 0.9)	(0.3, 0.633, 0.9)	(0.333, 0.177, 0.111)

С учетом критерия результата или критерия затрат в соответствии с формулами (15) и (16) выполняется нормализация нечетких решений (табл. 15).

Для расчета взвешенной нормализованной матрицы используются весовые коэффициенты показателей логистических потоков, полученные методом fuzzy AHP (см. табл. 13). Результаты представлены в табл. 16.

После определения нечеткого положительного идеального решения (FPIS) и нечеткого отрицательного идеального решения (FNIS) [формулы (18) и (19)] рассчитывается расстояние (d_i^+ , d_i^-) между каждой альтернативой, с одной стороны, и значениями FPIS и FNIS — с другой [формулы (20) и (21)]. Ранжирование инструментов зеленой логистики производится по величине коэффициента близости CC_i . Результаты ранжирования представлены в табл. 17.

Результаты ранжирования инструментов зеленой логистики по степени их воздействия на параметры и показатели логистических потоков рекомендуется использовать при выборе того или иного инструмента с целью корректировки фактических значений показателей логистических потоков в соответствии с целями концепции устойчивого развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время многие транспортные и логистические компании в своей практической деятельности сталкиваются с проблемой выбора наиболее эффективной зеленой технологии из множества возможных. Для этого лицам, принимающим решение, требуется анализировать большое количество параметров и показателей перевозочного процесса, а также учитывать различные и зачастую противоречивые критерии.

Таблица 16

Взвешенная нормированная матрица нечетких решений инструментов зеленой логистики

Инструменты зеленой логистики	Показатели логистических потоков					
	E1	E2	E3	...	M2	M3
I_1	(0.0576, 0.1089, 0.1729)	(0.0008, 0.0005, 0.0004)	(0.0289, 0.0481, 0.0578)	...	(0.0151, 0.0753, 0.1355)	(0.0004, 0.0002, 0.0001)
I_2	(0.0961, 0.1473, 0.1922)	(0.0013, 0.0006, 0.0004)	(0.0289, 0.0404, 0.052)	...	(0.0452, 0.0954, 0.1355)	(0.0004, 0.0002, 0.0001)
I_3	(0.0192, 0.0833, 0.1729)	(0.0038, 0.0007, 0.0004)	(0.0173, 0.0366, 0.0578)	...	(0.0151, 0.0552, 0.1054)	(0.0013, 0.0003, 0.0002)
I_4	(0.0576, 0.1089, 0.1729)	(0.0013, 0.0005, 0.0004)	(0.0058, 0.0366, 0.0578)	...	(0.0151, 0.0552, 0.1355)	(0.0013, 0.0008, 0.0003)
I_5	(0.0576, 0.1089, 0.1729)	(0.0013, 0.0006, 0.0004)	(0.0058, 0.0173, 0.0404)	...	(0.0151, 0.0351, 0.0753)	(0.0013, 0.0013, 0.0004)
I_6	(0.0192, 0.1089, 0.1922)	(0.0013, 0.0005, 0.0004)	(0.0058, 0.0289, 0.052)	...	(0.0151, 0.0753, 0.1355)	(0.0013, 0.0003, 0.0002)
I_7	(0.0192, 0.0961, 0.1729)	(0.0013, 0.0007, 0.0004)	(0.0058, 0.0173, 0.0404)	...	(0.0151, 0.0753, 0.1355)	(0.0013, 0.0002, 0.0001)
I_8	(0.0192, 0.0961, 0.1922)	(0.0038, 0.0008, 0.0004)	(0.0058, 0.0096, 0.0289)	...	(0.1054, 0.1355, 0.1506)	(0.0013, 0.0004, 0.0002)
I_9	(0.0192, 0.0448, 0.0961)	(0.0038, 0.001, 0.0005)	(0.0058, 0.0058, 0.0173)	...	(0.0151, 0.0753, 0.1355)	(0.0013, 0.0005, 0.0002)
I_{10}	(0.0192, 0.0833, 0.1345)	(0.0038, 0.0007, 0.0004)	(0.0058, 0.0096, 0.0289)	...	(0.0151, 0.0753, 0.1355)	(0.0013, 0.0002, 0.0001)
I_{11}	(0.0192, 0.1089, 0.1729)	(0.0038, 0.0008, 0.0004)	(0.0058, 0.0135, 0.0289)	...	(0.0151, 0.0954, 0.1506)	(0.0013, 0.0003, 0.0002)
I_{12}	(0.0192, 0.0833, 0.1729)	(0.0038, 0.0008, 0.0004)	(0.0058, 0.0135, 0.0289)	...	(0.0452, 0.0954, 0.1355)	(0.0004, 0.0002, 0.0001)

Таблица 17

Ранжирование инструментов зеленой логистики

Инструмент	d^+	d^-	CC_i	Ранг
Обеспечение технологического единства транспортно-складского процесса (I_6)	0.195214	0.416591	0.680921	1
Использование интермодальных технологий и смешанных перевозок (I_2)	0.211811	0.356473	0.62728	2
Оптимизация скорости движения транспортных средств (I_8)	0.232096	0.353631	0.603747	3
Оптимизация структуры грузопотоков (I_{11})	0.241263	0.363241	0.60089	4
Оптимизация маршрутов движения транспортных средств (I_7)	0.267667	0.334363	0.555393	5
Оперативное управление параметрами материальных потоков (I_{12})	0.281979	0.300057	0.51553	6
Выбор транспортных средств с большей грузоподъемностью (грузовместимостью) (I_4)	0.307761	0.28637	0.481998	7
Консолидация грузопотоков по направлениям (I_{10})	0.311175	0.268526	0.463214	8
Использование экологичных видов транспорта (I_1)	0.3334	0.245775	0.424354	9
Использование транспортных средств с наименьшим воздействием на окружающую среду (I_3)	0.354835	0.233818	0.397209	10
Эколовождение (I_9)	0.376805	0.190401	0.335682	11
Использование экологичных горюче-смазочных материалов (видов топлива) (I_5)	0.453394	0.096086	0.174868	12

Результатом неверного выбора в таких сложных условиях становится неустойчивость как самих транспортных организаций, так и перевозочного процесса.

В статье рассматриваются система обобщенных параметров и показателей логистических потоков, а также комплекс инструментов зеленой логистики, позволяющие принимать управлочные решения по выбору зеленых технологий в цепях поставок. Выбор эффективных инструментов зеленой логистики предлагаются осуществлять на основе нечеткого метода AHP-TOPSIS. Он представляет собой комбинацию fuzzy AHP — метода опре-

деления веса параметров и показателей логистических потоков — и fuzzy TOPSIS — метода ранжирования инструментов зеленой логистики. Ранг (вес) каждого инструмента определяется по результатам оценки его влияния на параметры и показатели логистических потоков. В статье приводится пример ранжирования инструментов зеленой логистики, реализуемых в цепях поставок с целью обеспечения их устойчивого развития.

Представленный метод может использоваться в качестве основы для формирования системы управления логистическими потоками в зеленых цепях поставок.



Литература

1. WTO. Trade in goods and services has fluctuated significantly over the last 20 years. URL: https://www.wto.org/english/res_e/statis_e/its2015_e/its15_highlights_e.pdf (дата обращения: 28.06.2019).
2. Logistics Market Outlook — 2022. URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/logistics-market> (дата обращения: 11.08.2019).
3. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=R (дата обращения: 05.04.2019).
4. Осинцев Н. А., Рахмангулов А. Н. «Зеленая» логистика в России и за рубежом: обзор лучших практик // Вестник РГУПС. 2018. № 3 (71). С. 120–134. ISSN 0201–727X.
5. Систематизация принципов «зеленой» логистики (Часть 2. Синтез принципов логистики и устойчивого развития) / Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, А. В. Сладковский, В. В. Багинова // Бюллетень транспортной информации. 2019. № 2 (284). С. 7–16. ISSN 2072–8115.
6. Систематизация принципов «зеленой» логистики (Часть 1. Анализ существующих принципов логистики и устойчивого развития) / Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, А. В. Сладковский, В. В. Багинова // Бюллетень транспортной информации. 2019. № 1 (283). С. 10–16. ISSN 2072–8115.
7. Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N., Muravev D. Green Logistics: A System of Methods and Instruments — Part 2 // Naše more. 2018. Vol. 65. No. 1. Pp. 49–55.
8. Banasik A., Bloemhof-Ruwaard J. M., Kanellopoulos A. et al. Multi-criteria decision making approaches for green supply chains: a review // Flexible Services and Manufacturing Journal. 2018. Vol. 30. No. 3. Pp. 366–396.
9. Миротин Л. Б. Транспортная логистика : учебник для транспортных вузов. Москва : Экзамен, 2002. 511 с.
10. Осинцев Н. Параметры и показатели потоков в зеленых цепях поставок // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2019. Т. 9. № 1. С. 27–40. ISSN 2222–9396.
11. Govindan K., Khodaverdi R., Vafadarnikjoo A. Intuitionistic fuzzy based DEMATEL method for developing green practices and performances in a green supply chain // Expert Systems with Applications. 2015. Vol. 42. No. 20. Pp. 7207–7220.
12. Lin K.-P., Tseng M.-L., Pai P.-F. Sustainable supply chain management using approximate fuzzy DEMATEL method // Resources, Conservation and Recycling. 2018. Vol. 128. Pp. 134–142.
13. Uygun Ö., Dede A. Performance evaluation of green supply chain management using integrated fuzzy multi-criteria decision making techniques // Computers & Industrial Engineering. 2016. Vol. 102. Pp. 502–511.
14. Chen Z., Ming X., Zhang X. et al. A rough-fuzzy DEMATEL-ANP method for evaluating sustainable value requirement of product service system // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 228. Pp. 485–508.
15. Cheng S.-H., Ou S. M., Lin S.-M. Using decision-making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) to explore the key success factors for green logistics manufacturers // African Journal of Business Management. 2018. Vol. 12. No. 3. Pp. 58–65.
16. Islam M.S., Tseng M.-L., Karia N., Lee C.-H. Assessing green supply chain practices in Bangladesh using fuzzy importance and per-

References

1. WTO. Trade in goods and services has fluctuated significantly over the last 20 years. URL: https://www.wto.org/english/res_e/statis_e/its2015_e/its15_highlights_e.pdf (access date: 28.06.2019).
2. Logistics Market Outlook — 2022. URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/logistics-market> (access date: 11.08.2019).
3. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=R (access date: 05.04.2019).
4. Osintsev N. A., Rakhmangulov A. N. «Green» logistics in Russia and abroad: best practices' review [Zelenaya logistika v Rossii i za rubezhom: obzor luchshikh praktik] // Vestnik RGUPS. 2018. No. 3 (71). Pp. 120–134. ISSN 0201–727X.
5. Systematization of the green logistics' principles. Part 2. Synthesis of the principles of logistics and sustainable development / N. A. Osintsev, A. N. Rakhmangulov, A. V. Sladkovski, V. V. Baginova [Sistematisatsiya printsypov «zelenoy» logistiki (Chast' 2. Sintez printsipov logistiki i ustoychivogo razvitiya)] // Bulletin of Transport Information. 2019. No. 2(284). Pp. 7–16. ISSN 2072–8115.
6. Systematization of the green logistics' principles. Part 1. The analysis of the existing logistics' and sustainable development principles / N. A. Osintsev, A. N. Rakhmangulov, A. V. Sladkovski, V. V. Baginova [Sistematisatsiya printsipov «zelenoy» logistiki (Chast' 1. Analiz sushhestvuyushikh printsipov logistiki i ustoychivogo razvitiya)] // Bulletin of Transport Information. 2019. No. 1(283). Pp. 10–16.
7. Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N., Muravev D. Green Logistics: A System of Methods and Instruments — Part 2 // Naše more. 2018. Vol. 65. No. 1. Pp. 49–55.
8. Banasik A., Bloemhof-Ruwaard J. M., Kanellopoulos A. et al. Multi-criteria decision making approaches for green supply chains: a review // Flexible Services and Manufacturing Journal. 2018. Vol. 30. No. 3. Pp. 366–396.
9. Mirotin L. B. Transport logistics [Transportnaya logistika] : textbook for transport universities. Moscow : Examination, 2002. 511 p.
10. Osintsev N. Flow indicators in green supply chains [Parametry i po-kazateli potokov v zelenykh tsepyakh postavok] // Modern Problems of Russian Transport Complex. 2019. Vol. 9. No. 1. Pp. 27–40. ISSN 2222–9396.
11. Govindan K., Khodaverdi R., Vafadarnikjoo A. Intuitionistic fuzzy based DEMATEL method for developing green practices and performances in a green supply chain // Expert Systems with Applications. 2015. Vol. 42. No. 20. Pp. 7207–7220.
12. Lin K.-P., Tseng M.-L., Pai P.-F. Sustainable supply chain management using approximate fuzzy DEMATEL method // Resources, Conservation and Recycling. 2018. Vol. 128. Pp. 134–142.
13. Uygun Ö., Dede A. Performance evaluation of green supply chain management using integrated fuzzy multi-criteria decision making techniques // Computers & Industrial Engineering. 2016. Vol. 102. Pp. 502–511.
14. Chen Z., Ming X., Zhang X. et al. A rough-fuzzy DEMATEL-ANP method for evaluating sustainable value requirement of product service system // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 228. Pp. 485–508.
15. Cheng S.-H., Ou S. M., Lin S.-M. Using decision-making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) to explore the key success factors for green logistics manufacturers // African Journal of Business Management. 2018. Vol. 12. No. 3. Pp. 58–65.
16. Islam M.S., Tseng M.-L., Karia N., Lee C.-H. Assessing green supply chain practices in Bangladesh using fuzzy importance and perfor-

- formance approach // Resources, Conservation and Recycling. 2018. Vol. 131. Pp. 134–145.
17. Rostamzadeh R., Govindan K., Esmaeili A., Sabaghi M. Application of fuzzy VIKOR for evaluation of green supply chain management practices // Ecological Indicators. 2015. Vol. 49. Pp. 188–203.
 18. Gul M., Celik E., Aydin N. et al. A state of the art literature review of VIKOR and its fuzzy extensions on applications // Applied Soft Computing. 2016. Vol. 46. Pp. 60–89.
 19. Awasthi A., Chauhan S. S., Omrani H. Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems // Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 38. No. 10. Pp. 12270–12280.
 20. Banaeian N., Mobli H., Nielsen I. E., Omid M. A methodology for green supplier selection in food industries // Technology Management for Sustainable Production and Logistics / Ed. by P. Golińska and A. Kawa. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. Pp. 3–23.
 21. Awasthi A., Chauhan S. S., Goyal S. K. A fuzzy multicriteria approach for evaluating environmental performance of suppliers // International Journal of Production Economics. 2010. Vol. 126. No. 2. Pp. 370–378.
 22. Kannan G., Pokharel S., Sasi Kumar P. A hybrid approach using ISM and fuzzy TOPSIS for the selection of reverse logistics provider // Resources, Conservation and Recycling. 2009. Vol. 54. No. 1. Pp. 28–36.
 23. Chen L., Ren J. Multi-attribute sustainability evaluation of alternative aviation fuels based on fuzzy ANP and fuzzy grey relational analysis // Journal of Air Transport Management. 2018. Vol. 68. Pp. 176–186.
 24. Sirisawat P., Kiatcharoenpol T. Fuzzy AHP-TOPSIS approaches to prioritizing solutions for reverse logistics barriers // Computers & Industrial Engineering. 2018. Vol. 117. Pp. 303–318.
 25. Prakash C., Barua M. K. Integration of AHP-TOPSIS method for prioritizing the solutions of reverse logistics adoption to overcome its barriers under fuzzy environment // Journal of Manufacturing Systems. 2015. Vol. 37. Pp. 599–615.
 26. Mathiyazhagan K., Govindan K., NoorulHaq A., Geng Y. An ISM approach for the barrier analysis in implementing green supply chain management // Journal of Cleaner Production. 2013. Vol. 47. Pp. 283–297.
 27. Yang D., Xiao T. Pricing and green level decisions of a green supply chain with governmental interventions under fuzzy uncertainties // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 149. Pp. 1174–1187.
 28. Chavoshlou A. S., Khamseh A. A., Naderi B. An optimization model of three-player payoff based on fuzzy game theory in green supply chain // Computers & Industrial Engineering. 2019. Vol. 128. Pp. 782–794.
 29. Chang D.-Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP // European Journal of Operational Research. 1996. Vol. 95. No. 3. Pp. 649–655.
 30. Gumus A. T. Evaluation of hazardous waste transportation firms by using a two step fuzzy-AHP and TOPSIS methodology // Expert Systems with Applications. 2009. Vol. 36. Issue 2. Pp. 4067–4074.
 31. Patil S. K., Kant R. A fuzzy AHP-TOPSIS framework for ranking the solutions of Knowledge Management adoption in Supply Chain to overcome its barriers // Expert Systems with Applications. 2014. Vol. 41. Issue 2. Pp. 679–693.
 32. Sun C.-C. A performance evaluation model by integrating fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods // Expert Systems with Applications. 2010. Vol. 37. Issue 12. Pp. 7745–7754.
 33. performance approach // Resources, Conservation and Recycling. 2018. Vol. 131. Pp. 134–145.
 34. Rostamzadeh R., Govindan K., Esmaeili A., Sabaghi M. Application of fuzzy VIKOR for evaluation of green supply chain management practices // Ecological Indicators. 2015. Vol. 49. Pp. 188–203.
 35. Gul M., Celik E., Aydin N. et al. A state of the art literature review of VIKOR and its fuzzy extensions on applications // Applied Soft Computing. 2016. Vol. 46. Pp. 60–89.
 36. Awasthi A., Chauhan S. S., Omrani H. Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems // Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 38. No. 10. Pp. 12270–12280.
 37. Banaeian N., Mobli H., Nielsen I. E., Omid M. A methodology for green supplier selection in food industries // Technology Management for Sustainable Production and Logistics / Ed. by P. Golińska and A. Kawa. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. Pp. 3–23.
 38. Awasthi A., Chauhan S. S., Goyal S. K. A fuzzy multicriteria approach for evaluating environmental performance of suppliers // International Journal of Production Economics. 2010. Vol. 126. No. 2. Pp. 370–378.
 39. Kannan G., Pokharel S., Sasi Kumar P. A hybrid approach using ISM and fuzzy TOPSIS for the selection of reverse logistics provider // Resources, Conservation and Recycling. 2009. Vol. 54. No. 1. Pp. 28–36.
 40. Chen L., Ren J. Multi-attribute sustainability evaluation of alternative aviation fuels based on fuzzy ANP and fuzzy grey relational analysis // Journal of Air Transport Management. 2018. Vol. 68. Pp. 176–186.
 41. Sirisawat P., Kiatcharoenpol T. Fuzzy AHP-TOPSIS approaches to prioritizing solutions for reverse logistics barriers // Computers & Industrial Engineering. 2018. Vol. 117. Pp. 303–318.
 42. Prakash C., Barua M. K. Integration of AHP-TOPSIS method for prioritizing the solutions of reverse logistics adoption to overcome its barriers under fuzzy environment // Journal of Manufacturing Systems. 2015. Vol. 37. Pp. 599–615.
 43. Mathiyazhagan K., Govindan K., NoorulHaq A., Geng Y. An ISM approach for the barrier analysis in implementing green supply chain management // Journal of Cleaner Production. 2013. Vol. 47. Pp. 283–297.
 44. Yang D., Xiao T. Pricing and green level decisions of a green supply chain with governmental interventions under fuzzy uncertainties // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 149. Pp. 1174–1187.
 45. Chavoshlou A. S., Khamseh A. A., Naderi B. An optimization model of three-player payoff based on fuzzy game theory in green supply chain // Computers & Industrial Engineering. 2019. Vol. 128. Pp. 782–794.
 46. Chang D.-Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP // European Journal of Operational Research. 1996. Vol. 95. No. 3. Pp. 649–655.
 47. Gumus A. T. Evaluation of hazardous waste transportation firms by using a two step fuzzy-AHP and TOPSIS methodology // Expert Systems with Applications. 2009. Vol. 36. Issue 2. Pp. 4067–4074.
 48. Patil S. K., Kant R. A fuzzy AHP-TOPSIS framework for ranking the solutions of Knowledge Management adoption in Supply Chain to overcome its barriers // Expert Systems with Applications. 2014. Vol. 41. Issue 2. Pp. 679–693.
 49. Sun C.-C. A performance evaluation model by integrating fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods // Expert Systems with Applications. 2010. Vol. 37. Issue 12. Pp. 7745–7754.

33. Saaty T. L. *The Analytical Hierarchical Process*. New York : McGraw-Hill, 1980.
34. Cheng C.-H., Yang K.-L., Hwang C.-L. Evaluating attack helicopters by AHP based on linguistic variable weight // *European Journal of Operational Research*. 1999. Vol. 116. No. 2. Pp. 423–435.
35. Yang C.-C., Chen B.-S. Key quality performance evaluation using fuzzy AHP // *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*. 2004. Vol. 21. Issue 6. Pp. 543–550.
36. Hwang C.-L., Yoon K. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*. Berlin; New York : Springer-Verlag, 1981. 259 p.
37. Behzadian M., Khanmohammadi Otaghara S., Yazdani M., Ignatius J. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications // *Expert Systems with Applications*. 2012. Vol. 39. Issue 17. Pp. 13051–13069.
38. Salih M. M., Zaidan B. B., Zaidan A. A., Ahmed M. A. Survey on fuzzy TOPSIS state-of-the-art between 2007 and 2017 // *Computers & Operations Research*. 2019. Vol. 104. Pp. 207–227.
39. Kannan D., Jabbour A. B. L. d. S., Jabbour C. J. C. Selecting green suppliers based on GSCM practices: Using fuzzy TOPSIS applied to a Brazilian electronics company // *European Journal of Operational Research*. 2014. Vol. 233. No. 2. Pp. 432–447.
40. Nadaban S., Dzitac S., Dzitac I. Fuzzy TOPSIS: A General View // *Procedia Computer Science*. 2016. 91. Pp. 823–831.
33. Saaty T. L. *The Analytical Hierarchical Process*. New York : McGraw-Hill, 1980.
34. Cheng C.-H., Yang K.-L., Hwang C.-L. Evaluating attack helicopters by AHP based on linguistic variable weight // *European Journal of Operational Research*. 1999. Vol. 116. No. 2. Pp. 423–435.
35. Yang C.-C., Chen B.-S. Key quality performance evaluation using fuzzy AHP // *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*. 2004. Vol. 21. Issue 6. Pp. 543–550.
36. Hwang C.-L., Yoon K. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*. Berlin; New York : Springer-Verlag, 1981. 259 p.
37. Behzadian M., Khanmohammadi Otaghara S., Yazdani M., Ignatius J. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications // *Expert Systems with Applications*. 2012. Vol. 39. Issue 17. Pp. 13051–13069.
38. Salih M. M., Zaidan B. B., Zaidan A. A., Ahmed M. A. Survey on fuzzy TOPSIS state-of-the-art between 2007 and 2017 // *Computers & Operations Research*. 2019. Vol. 104. Pp. 207–227.
39. Kannan D., Jabbour A. B. L. d. S., Jabbour C. J. C. Selecting green suppliers based on GSCM practices: Using fuzzy TOPSIS applied to a Brazilian electronics company // *European Journal of Operational Research*. 2014. Vol. 233. No. 2. Pp. 432–447.
40. Nadaban S., Dzitac S., Dzitac I. Fuzzy TOPSIS: A General View // *Procedia Computer Science*. 2016. 91. Pp. 823–831.

Объем статьи 1,2 авторских листа

УДК 656.254.5

**Нина Фридриховна Сирина, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны»
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,**

**Ольга Андреевна Сисина, научный сотрудник Уральского института Государственной противопожарной службы
Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям
и ликвидации последствий стихийных бедствий (Ури ГПС МЧС России), Екатеринбург, Россия**

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА ДЛЯ СЛУЧАЯ ВОЗНИКШИХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ВО ВРЕМЯ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

**Nina Fridrikhovna Sirina, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars Department,
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,**

**Olga Andreevna Sisina, Researcher, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia
(UISFS of EMERCOM of Russia), Ekaterinburg, Russia**

Simulation modeling of information exchange for the case of emergency situations during the transportation process on the railway transport

Аннотация

Ситуации нештатного и чрезвычайного характера, происходящие во время перевозочного процесса на железнодорожном транспорте, приводят к изменяющимся во времени величинам потери жизни, здоровья людей и материального ущерба. При этом увеличение времени реагирования на возникшие ситуации служб, ответственных за их ликвидацию, увеличивает последствия и масштабы происшествий. Одним из параметров, определяющим задержки реагирования специальных служб и структур, является время, затраченное на доведение информации от момента обнаружения и начала передачи сведений о ситуации нештатного и чрезвычайного характера до момента доведения этих сведений до всех должностных лиц структур железной дороги и других экстренных служб реагирования территориального образования, в пределах которого такая ситуация произошла.

В статье представлены основные теоретические выкладки математической модели, описывающей систему информационного взаимодействия и обмена при доведении информации о ситуации нештатного и чрезвычайного характера, возникшей во время перевозочного процесса на Свердловской железной дороге (СвЖД), и разработана имитационная модель в пакете прикладных программ MATLAB и библиотек SimEvents.

Ключевые слова: информационный обмен, перевозочный процесс, чрезвычайная ситуация, имитационное моделирование.

Summary

Emergencies that occur during the transportation process in rail transport entail variable over time values of loss of life, human health and material damage. Increasing the response time of emergency response services leads to an increase in the consequences and scale of incidents. One of the parameters determining delays in the response of special services and structures is the time taken to bring information from the emergency site, from the moment it was discovered and the transfer of information about it to the moment that this information was communicated to all officials of the railway structures and other emergency response services of the territorial unit within which the accident occurred.

The paper presents the main theoretical calculations of a mathematical model describing the system of information interaction and exchange when communicating information about an emergency situation that occurred during the transportation process on the Sverdlovsk railway and developed a simulation model in the package of MATLAB application programs and SimEvents libraries.

Keywords: information exchange, transportation process, emergency, simulation modeling.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-15-22

В соответствии с Положением о системе информационного реагирования ОАО «РЖД» [1] транспортные происшествия на железных дорогах относятся к нештатным и чрезвычайным ситуациям (НиЧС), создающим имиджевые и репутационные риски и угрозы.

При решении вопроса минимизации последствий, рисков и угроз в случае возникшей нештатной и чрезвычайной ситуации на железнодорожном транспорте необходимо понимать, что существует прямая зависимость между временем привлечения структур и подразделений, ответственных за ликвидацию аварийной ситуации, и стоимостью материальных потерь, ущербом, нанесенным здоровью и жизни людей.

Задержки во времени привлечения обусловлены прежде всего затратами времени на обнаружение причины и места событий чрезвычайного характера, а также времени передачи сведений о сложившейся ситуации до всех ответственных и привлекаемых к ее ликвидации подразделений. Вопросы, связанные с обнаружением неисправности, которая может привести к НиЧС, описаны в программе реализации стратегии [2].

Вторая составляющая временных задержек привлечения — время, затраченное на доведение информации с места возникновения ситуации чрезвычайного характера

до всех ответственных структур железной дороги и служб экстренного реагирования, на территории которых она произошла. Величина таких временных задержек зависит от принятой на сети железных дорог организации передачи данных при возникновении НЧС. Варьирование этим параметром возможно за счет изменения порядка и автоматизации процесса информирования в зависимости от вида и масштаба возникшей ситуации. Данный вопрос не рассматривается в документах, планирующих развитие сферы безопасности перевозочного процесса ОАО «РЖД», и требует дальнейшего исследования с учетом изменившейся в России системы реагирования на нештатные и чрезвычайные ситуации.

Сведения о ситуациях нештатного и чрезвычайного характера, произошедших во время перевозочного процесса на железной дороге (информационный обмен о НЧС), передаются диспетчерами службы управления движением по каналам оперативно-технологической связи. На железной дороге (филиале ОАО «РЖД») управление движением осуществляется следующим образом: в пределах станции — маневровым диспетчером или дежурным по станции (ДСП); в пределах диспетчерских участков — поездным диспетчером (ДНЦ); в пределах региона управления — дорожным диспетчером по району управления (ДГП РУ); в границах железной дороги — старшим дорожным диспетчером (ДГС) дорожного центра управления перевозками (ДЦУП). В перечень должностных лиц и структур, до которых дежурная диспетчерская смена железной дороги, где произошла чрезвычайная ситуация, должна довести информацию о ЧС, входят: начальник и заместитель начальника железной дороги (филиала ОАО «РЖД»), руководители дирекций и служб, причастных к ликвидации ситуации чрезвычайного характера и/или способствующих функционированию дороги в режиме ликвидации данной ситуации, государственное предприятие «Ведомственная охрана железнодорожного транспорта Российской Федерации на дороге — филиал ОАО «РЖД» (ФГП ВО ЖДТ России на дороге), негосударственное учреждение здравоохранения ОАО «РЖД» (НУЗ ОАО «РЖД»). При ситуациях нештатного и чрезвычайного характера, которые могут повлечь за собой угрозу здоровью или жизни людей, сходы, крушения и столкновения подвижного состава, взрывы и пожары на подвижном составе, а также выбросы вредных химических веществ, требуется привлечение территориальных органов МЧС России [3, 4]. В случае увеличения масштабов ситуации и тяжести последствий могут быть также привлечены подсистемы единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС), в числе которых и подсистема ОАО «РЖД».

Взаимодействие с территориальными органами МЧС России и подсистемами РСЧС осуществляется по сетям телефонной и факсимильной связи, в том числе по сетям телефонной связи общего пользования. Органом взаимодействия со стороны МЧС России является оперативный дежурный центра управления в кризисных ситуациях Главного управления МЧС России (ЦУКС ГУ МЧС России). Взаимодействие с системой РСЧС в зависимости от уровня ЧС осуществляется на муниципальном уровне через единую дежурно-диспетчерскую службу (ЕДДС) или центр обслуживания вызовов (ЦОВ) муниципального об-

разования, на региональном уровне — через информационную систему ЦУКС ГУ МЧС России.

Подробный анализ нормативных документов ОАО «РЖД», порядок информирования и разработанные согласно рассмотренным документам структурные схемы процесса информационного обмена в случае возникших ситуаций чрезвычайного характера, различных по масштабам, произошедших во время перевозок на железнодорожном транспорте, на примере Свердловской железной дороги (СвЖД) представлены в научной статье [3].

Итоговая схема информационного обмена для СвЖД в виде взаимоувязанных систем массового обслуживания (СМО), образующих сеть массового обслуживания (СeМО) — многофазную СМО, представлена на рис. 1. Взаимосвязь между звенями СeМО установлена в соответствии с нормативными документами, регламентирующими функционирование железной дороги при различных НЧС во время перевозочного процесса. Благодаря представлению отдельных звеньев в цепи передачи сведений о ситуации чрезвычайного характера в виде СМО появляется возможность оценить временные параметры прохождения сообщений с места происшествия до всех подразделений, задействованных при функционировании дороги в режиме НЧС, и структурных подразделений по ликвидации данной ситуации.

Построенная СeМО состоит из конечного числа СМО, между которыми передаются сообщения. СeМО нелинейна, так как возможны потери сообщений из-за ограниченной емкости накопителей L СМО и/или размножения сообщений в сети. Рассматриваемая многофазная СМО является открытой: сообщения могут поступать от внешнего источника и выходить из сети по завершении обслуживания. Формируемый поток сообщений может быть как однородным, так и неоднородным — различаться приоритетами. Характер поступления и обслуживания сообщений стохастический и описывается законами распределения, которые рассматриваются ниже.

Каждая СМО в СeМО включает в себя блок накопителя L емкостью n_L и каналы обслуживания K в количестве n_K . Число сообщений n_c , передаваемых в единицу времени между звеньями СeМО, может составлять $0 \leq n_c < \infty$. Если при поступлении сообщения все обслуживающие каналы СМО заняты, то сообщение будет вставать в очередь в накопителе L . Емкость накопителя n_L определяет систему обслуживания этого звена как систему с отказами или с возможностью создания ограниченной и неограниченной по времени либо по количеству сообщений очереди. Переход к следующему звену СeМО будет происходить по окончании обслуживания в предыдущем звене сети.

Источники первичных сообщений в СeМО (см. рис. 1) — генераторы I_1, \dots, I_n , они создают входные потоки, поступающие на СМО с интенсивностью $\lambda_{\text{вп}_1}, \dots, \lambda_{\text{вп}_n}$ и имеющие одинаковое экспоненциальное распределение. Потоки первичных сообщений (входные потоки), формируемые генераторами I_1, \dots, I_n , являются случайными, стационарными (рекурентными), т.е. не зависящими от времени $\lambda_{\text{вп}_1}, \dots, \lambda_{\text{вп}_n} = \text{const}(t)$, у каждого из них отсутствует последействие, кроме того, они являются ординарными. Учитывая перечисленные характеристики входного потока с генераторами I_1, \dots, I_n , получаем, что эти потоки являются стационарными пуассоновскими (простейшими) [5].

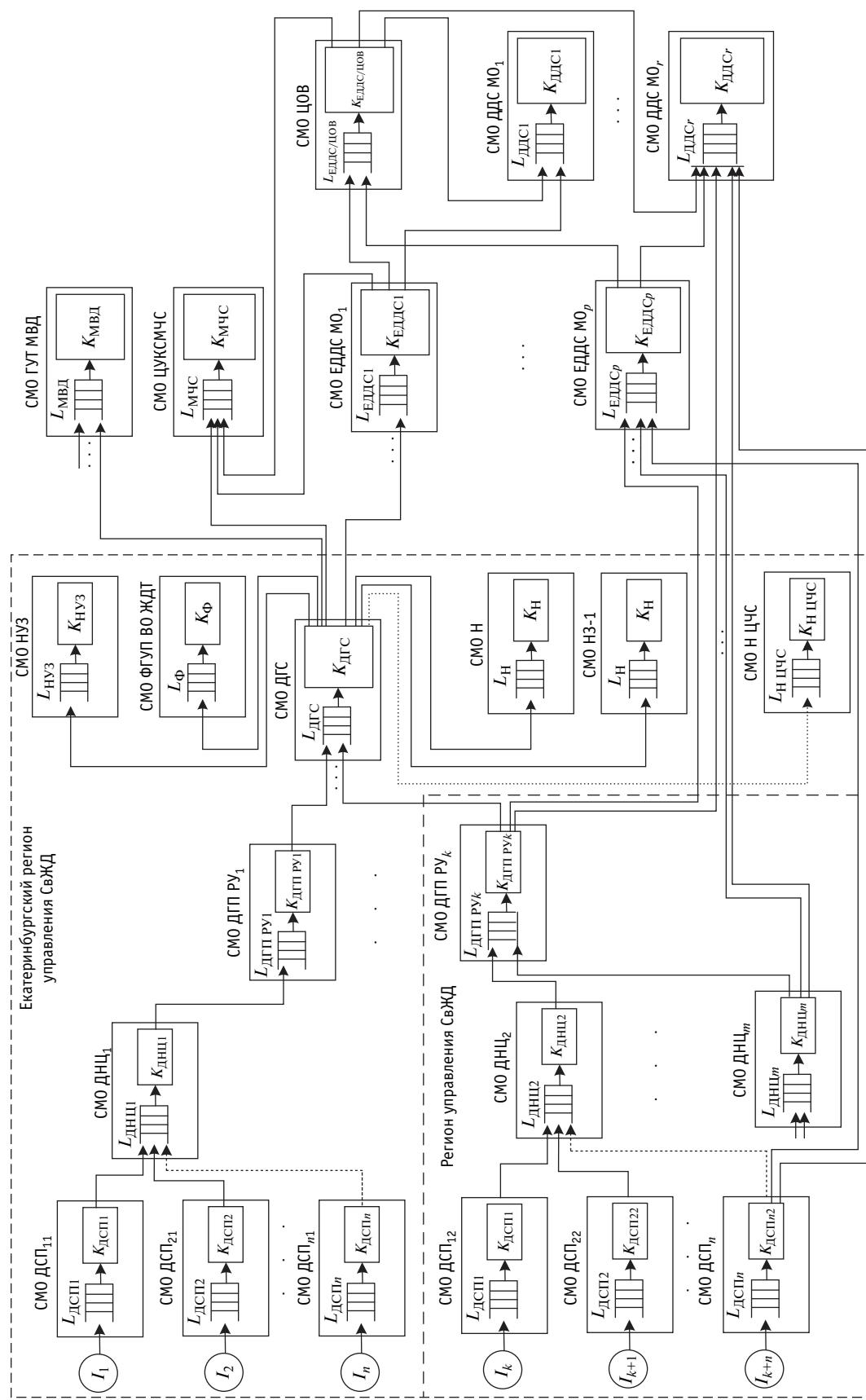


Рис. 1. Схема информационного обмена при возникновении ситуаций чрезвычайного характера на железнодорожном транспорте в виде многофазной СМО



Вероятность появления n_c сообщений в каждом входном потоке от источников I_1, \dots, I_n за время t_Δ с учетом того, что поток является простейшим, определяется [5] по выражению

$$P_{n_c}(n_c, t_\Delta) = \frac{(\lambda_{\text{вп}} t_\Delta)^{n_c}}{n_c!} e^{-\lambda_{\text{вп}} t_\Delta}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{вп}} t_\Delta = M$ — математическое ожидание случайной величины n_c .

Вероятность отсутствия сообщений за время t_Δ :

$$P_{n_c}(0, t_\Delta) = e^{-\lambda_{\text{вп}} t_\Delta}. \quad (2)$$

Функция распределения $F_B(t)$, противоположная событию $P_{n_c}(0, t_\Delta)$, задает временной интервал t между соседними сообщениями, идущими во входном потоке от источников I_1, \dots, I_n :

$$F_B(t) = P(t \leq t_\Delta) = 1 - P_{n_c}(0, t_\Delta) = 1 - e^{-\lambda_{\text{вп}} t_\Delta} \text{ при } t > 0. \quad (3)$$

Функция $F_B(t)$ показывает вероятность того, что интервал t будет меньше некоторого временного интервала t_Δ .

Тогда плотность распределения интервалов t между соседними сообщениями составит

$$f_B(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda_{\text{вп}} e^{-\lambda_{\text{вп}} t_\Delta} \text{ при } t > 0. \quad (4)$$

Количество входных потоков на каждую СМО от генераторов I_1, \dots, I_n в интервале времени t_Δ , представляющих собой сообщения, поступающие от локомотивных бригад, определяется количеством требующих обслуживания сообщений n_c .

Среднее время обслуживания сообщения каждой СМО находится как сумма среднего времени ожидания сообщения в очереди на обслуживание \bar{t}_L и среднего времени $\bar{t}_{\text{СМО}}$, в течение которого сообщение будет отработано и перенаправлено на выход СМО:

$$\bar{t}_{\text{обс}} = \bar{t}_{L_{\text{оч}}} + \bar{t}_{\text{СМО}} = \frac{M(n_{L_{\text{оч}}})}{\lambda_{\text{вп}}} + \frac{P_{\text{обс}}}{\mu_{\text{СМО}}}, \quad (5)$$

где $n_{L_{\text{оч}}}$ — число сообщений в очереди накопителя L ; $M(n_{L_{\text{оч}}})$ — математическое ожидание $n_{L_{\text{оч}}}$; $\lambda_{\text{вп}}$ — интенсивность входного потока, поступающего на СМО; $P_{\text{обс}}$ — вероятность обслуживания поступившего в СМО сообщения; $\mu_{\text{СМО}}$ — интенсивность обслуживания $n_k = 1, \dots, k$ каналами поступивших в СМО сообщений.

Если каждая СМО имеет $n_k = 1, \dots, k$ каналов обслуживания и на момент приема потока сообщений есть $n_k = n_c$ свободных каналов K , одновременно обслуживающих сообщения по экспоненциальному распределению, тогда время обслуживания $t_{\text{СМО}}$ поступивших на вход СМО сообщений определяется с помощью функцией плотности распределения, имеющей вид

$$f_K(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0 \\ \mu_{\text{СМО}} e^{-\mu_{\text{СМО}} t} & \text{при } t > 0. \end{cases} \quad (6)$$

Если свободных каналов меньше, чем пришедших на обслуживание сообщений, т.е. $n_k < n_c$, то в системе с отказами сообщение покинет СМО необслуженной, а в системе с ограниченной очередью при $n_k < n_c$ и длине очереди n_l в накопителе L , меньшей или равной предельной емкости накопителя, т.е. $n_l (n_l \leq n_L)$, сообщения будут обрабатываться по мере освобождения каналов СМО.

Соотнесение интенсивностей входного потока сообщений на СМО $\lambda_{\text{вп}}$ и потока обслуживания $\mu_{\text{СМО}}$ при представлении СеМО в виде графа состояний и применении схемы гибели и размножения [5] определяет вероятности изменения состояния СеМО.

Для n_k -канальной СМО в зависимости от возможности создания очереди обслуживания $n_l = 1, \dots, n_L$ в теории исследования СМО определены финальные вероятности нахождения системы в различных состояниях и выведены формулы, взаимосвязывающие величины $\lambda_{\text{вп}}$ и $\mu_{\text{СМО}}$ [5].

Чтобы СеМОправлялась с нагрузкой, каждая СМО в СеМО должна справляться с поступающей нагрузкой. Так, для одноканальной СМО соотношение интенсивности входного потока к интенсивности обслуживания $\rho_{\text{вп}} = \frac{\lambda_{\text{вп}}}{\mu_{\text{СМО}}}$ должно соответствовать условию $\rho_{\text{вп}} < 1$. При $\rho_{\text{вп}} \geq 1$ время обслуживания и очередь вызовов в каждом блоке СМО неограниченно растут.

Для многоканальной СМО соответствующие условия: $\frac{\rho_{\text{вп}}}{n_k} < 1$ при $1 \leq n_k < k$ — СМО успевает обработать всю поступающую нагрузку; $\frac{\rho_{\text{вп}}}{n_k} \geq 1$ при $1 \leq n_k < k$ — в СМО формируются растущие очереди в накопителе L .

СМО разработанной СеМО (см. рис. 1) имеют различную архитектуру организации обслуживания поступающих сообщений. Для СМО, имитирующих работу диспетчерского состава службы движения железнодорожного транспорта, характерно представление системы обслуживания как одноканальной с отказами. Для СМО, имитирующих работу ЕДДС, ЦУКС идежурно-диспетчерских служб (ДДС) экстренных оперативных служб муниципального образования, — как многоканальной с ограниченными очередями. Предлагаемая СеМО (см. рис. 1) не накладывает ограничений на вид СМО, поэтому возможны исследования, учитывающие различную организацию системы обслуживания.

Для СМО, имитирующих работу ЕДДС, ЦОВ и ДДС города, входной поток вызовов нестационарный. Это означает, что интенсивность потока вызовов на соответствующие службы может изменяться в течение времени, т.е. $\lambda_{BC_1}, \dots, \lambda_{BC_n} = \text{var}(t)$ — нестационарный пуссоновский поток.

Среднее время нахождения сообщения в открытой СМО за промежуток времени Δ вне зависимости от характера входного потока, времени и дисциплины обслуживания, согласно формуле Литтла [5], определяется соотношением среднего числа находящихся в СМО сообщений $\bar{n}_{\text{СМО}}$ к интенсивности входного потока $\lambda_{\text{вп}}$, поступающего на вход СМО:

$$\bar{t}_{\text{СМО}} = \frac{\bar{n}_{\text{СМО}}}{\lambda_{\text{вп}}}. \quad (7)$$



Поскольку $\bar{n}_{\text{СМО}}$ определяется как интеграл от разности функции входного $f_{\text{вх}}(t)$ и выходного потока сообщений $f_{\text{вых}}(t)$, соответственно пришедших на СМО и ушедших с нее за время Δ :

$$\bar{n}_{\text{СМО}} = \frac{1}{\Delta} \int_0^\Delta (f_{\text{вх}}(t) - f_{\text{вых}}(t)) dt, \quad (8)$$

то подынтегральная функция, по сути, представляет собой суммарное время t_i нахождения i -го вызова в системе ($i = 1, \dots, n_c$):

$$\bar{n}_{\text{СМО}} = \frac{1}{\Delta \lambda_{\text{в}}} \sum_{i=1}^{n_c} t_i \lambda_{\text{в}}, \quad (9)$$

где $\Delta \lambda_{\text{в}}$ определяет среднее число сообщений, поступивших на вход СМО за интервал времени Δ .

Среднее число сообщений $\bar{n}_{\text{СМО}}$, обслуживаемых каждым звеном СМО за некоторый промежуток времени t_Δ , с учетом формулы финальной вероятности, определяющей вероятность обслуживания $P_{\text{обс}}$ пришедшего сообщения в n_k -канальной СМО при $n_k = 1, \dots, k$ и $n_L = 1$, при представлении СМО в виде размеченного графа состояний определяется как

$$\bar{n}_{\text{СМО}} = \lambda_{\text{в}} \cdot P_{\text{обс}} = \lambda_{\text{в}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{вп}}^{n_k}}{n_k!} p_0 \right), \quad (10)$$

где p_0 — вероятность нахождения СМО в состоянии простого,

$$p_0 = \left(\sum_{n=0}^{n_k} \frac{\rho_{\text{вп}}^n}{n!} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Среднее число каналов, занятых обслуживанием сообщений в n_k -канальной СМО при $n_k \geq 2$ и $n_L = 1$ за время t_Δ определяется интенсивностью обслуживания $\mu_{\text{СМО}}$:

$$\bar{n}_k = \frac{\bar{n}_{\text{СМО}}}{\mu_{\text{СМО}}} = \frac{\lambda_{\text{в}} \left(1 - \frac{\rho_{\text{вп}}^{n_k}}{n_k!} p_0 \right)}{\mu_{\text{СМО}}}. \quad (12)$$

Среднее время нахождения сообщения в очереди на обслуживание $\bar{t}_{L_{\text{оч}}}$, согласно формуле Литтла [5], равно отношению среднего числа сообщений в очереди накопителя L , т.е. $\bar{n}_{L_{\text{оч}}}$, к интенсивности входного потока $\lambda_{\text{в}}$:

$$\bar{t}_{L_{\text{оч}}} = \frac{\bar{n}_{L_{\text{оч}}}}{\lambda_{\text{в}}}. \quad (13)$$

Среднее число сообщений $\bar{n}_{L_{\text{оч}}}$ в очереди накопителя L определяется по формуле (9), с той лишь разницей, что t_j есть время нахождения j -го сообщения в очереди СМО.

Среднее число сообщений в очереди накопителя L , обслуживаемых каждым звеном СМО для n_k -канальной СМО при $n_k \geq 2$ и $n_l \leq n_L$ ($n_L = 1, \dots, l$, количество сообщений в очереди $\bar{n}_{L_{\text{оч}}} = 1, \dots, s$), в случае представления СМО в виде размеченного графа состояний вычисляется следующим образом [5]:

$$\bar{n}_{L_{\text{оч}}} = M(n_{L_{\text{оч}}}) = p_0 \cdot \frac{(\rho_{\text{в}})^{n_k+1}}{n_k!} \cdot \frac{1 - \left(\frac{\rho_{\text{в}}}{n_k} \right)^s \left(s + 1 - \frac{s \rho_{\text{в}}}{n_k} \right)}{\left(1 - \frac{\rho_{\text{в}}}{n_k} \right)^2}. \quad (14)$$

Среднее число каналов, занятых обслуживанием сообщений, для n_k -канальной СМО при $n_k \geq 2$ и $n_l \leq n_L$ ($n_L = 1, \dots, l$, количество сообщений в очереди $\bar{n}_{L_{\text{оч}}} = 1, \dots, s$) будет таким:

$$\bar{n}_{k,\text{оч}} = M(n_{L_{\text{оч}}}) = \rho_{\text{в}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{в}}^{n_k+s}}{n_k^s \cdot n_k!} \cdot p_0 \right), \quad (15)$$

где p_0 определяет вероятность нахождения СМО в состоянии, когда все n_k каналы свободны, т.е.

$$p_0 = \left(\sum_{n=0}^{n_k} \frac{\rho_{\text{в}}^n}{n!} + \frac{\rho_{\text{в}}^{n_k+1}}{n_k \cdot n_k!} + \frac{\rho_{\text{в}}^{n_k+2}}{n_k^2 \cdot n_k!} + \dots + \frac{\rho_{\text{в}}^{n_k+s}}{n_k^s \cdot n_k!} \right)^{-1}. \quad (16)$$

На каждую последующую СМО, согласно предельной теореме [5], всегда будет поступать суммарный поток сообщений от предыдущих СМО. Суммарный поток будет сходиться к пуссоновскому при увеличении числа входящих в него потоков. При формировании суммарного потока как стационарными, так и нестационарными потоками его интенсивность определяется как

$$\lambda = \sum_{n_c=1}^m \lambda_{n_c}. \quad (17)$$

Входные потоки сообщений, обслуженные звеньями многофазной СМО, на выходе каждой СМО будут иметь ограниченное последействие, так как вероятность появления сообщения на входе каждой следующей СМО будет зависеть от того, через какие моменты времени, равные времени обслуживания $0 < t_{\text{обс}} < \infty$ сообщения предыдущей СМО, сообщение придет на вход этой СМО. Также выходные потоки с СМО не будут ordinaryными т.е. на вход следующей СМО вполне вероятно одновременное прибытие двух и более сообщений.

Сложность учета количества параметров и возможности их вариации при моделировании процесса в предложенной системе (см. рис. 1) с помощью прикладной математики приводит к применению для исследования инструментов имитационного моделирования. На рис. 2 представлена имитационная модель рассмотренной СМО, разработанная в пакете прикладных программ MATLAB с применением библиотек SimEvents. В основу функционирования разработанной имитационной модели положен вышеописанный математический аппарат.

Совокупность подсистем 1 (см. рис. 2) имитирует информационный обмен в штатных и нештатных ситуациях по системе оперативно-технологической связи с доведением всей требуемой информации до руководителей и ответственных лиц структурных подразделений в границах железной дороги. Совокупность подсистем 2 имитирует работу служб ЕДДС,

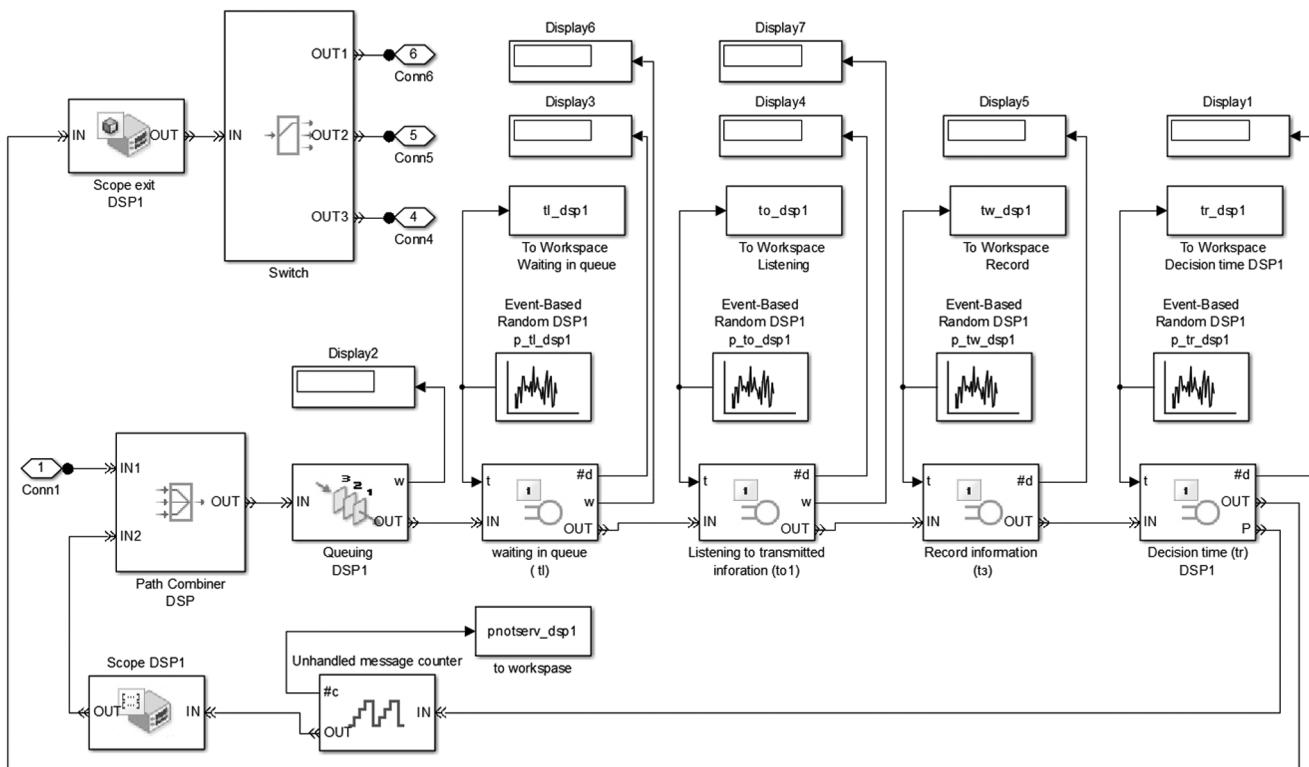


Рис. 3. Подсистема имитации обработки вызова Subsystem DSP диспетчером железной дороги

ЦОВ и ДДС экстренного реагирования, при этом в имитационной модели учтены закономерности изменения интенсивности входного потока сообщений на соответствующие службы от источников помимо железной дороги.

На рис. 3 представлена подсистема Subsystem DSP, имитирующая работу дежурного по станции. Аналогичную архитектуру имеют все подсистемы в совокупности 1, имитирующие работу диспетчеров службы движения железной дороги.

С момента формирования сведений о каких-либо чрезвычайных ситуациях на железной дороге и до момента получения каждым следующим должностным лицом этой информации сообщение проходит несколько этапов, которые характеризуются временными задержками, связанными с ожиданием в очереди на обслуживание, прослушиванием передаваемой информации, записью (регистрацией) полученной информации, принятием решения о необходимости дальнейшей передачи полученных сведений. Благодаря такому представлению процесса обработки сообщения появляется возможность оценить влияние временных задержек каждого этапа обработки сообщения на процесс информационного обмена в режиме штатных и нештатных ситуаций.

Для формирования порядка обслуживания сообщений, поступающих на вход каждой подсистемы, задаются параметры, определяющие принцип обслуживания и его приоритет. Принцип создания очереди для обслуживания сообщения подсистемой может быть FIFO (First in — First out) или LIFO (Last in — First out). Очередь обслуживания сообщений может быть из-

менена при изменении приоритета формируемого сообщения. Приоритет задается:

временем поступления сообщения на вход СМО. Очередь сообщений выстраивается в соответствии со временем формирования каждого сообщения;

важностью сообщения. Сообщение, пришедшее на обслуживание с наивысшим приоритетом важности, может вытеснить сообщение с более низким приоритетом важности.

Таким образом, разработанная имитационная модель позволит оценить временные параметры доведения информации о нештатной и чрезвычайной ситуации, возникшей во время перевозочного процесса, до каждого должностного лица структурного подразделения железной дороги и служб экстренного реагирования территориального образования, на территории которого произошла эта ситуация, а в случае увеличения масштабов НЧС — и до вышестоящих инстанций в соответствии с существующими регламентами передачи данных, принятыми в ОАО «РЖД». В результате проведенных имитационных исследований и полученных на их основе закономерностей появится возможность сравнить эффективность передачи данных о ситуациях нештатного и чрезвычайного характера, произошедших на железной дороге, при организации информационного обмена по каналам оперативно-технологической связи с параметрами при организации информационного обмена по каналам информационно-вычислительной сети железной дороги (единая магистральная цифровая сеть связи) с введением автоматизированных систем передачи информации.



Литература

1. Положение о системе информационного реагирования ОАО «РЖД» на нештатные ситуации : утверждено приказом ОАО «РЖД» от 09.01.2017 г. № 1. URL: <http://rly.su/ru/content> (дата обращения: 01.11.2019).
2. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года : распоряжение правительства Российской Федерации от 19.03.2019 г. № 466-р. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?structure_id=704&layer_id=5104&referrlayerid=5756&page5756_4417=3&id=7017 (дата обращения: 23.10.2019).
3. Сирина Н.Ф., Сисина О.А. Моделирование информационного обмена для случая возникших нештатных и чрезвычайных ситуаций во время перевозочного процесса на железнодорожном транспорте // Прогрессивные технологии в транспортных системах : сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции, Оренбург, 20–22 ноября 2019 г. / Минобр России ; ОГУ. Оренбург : ОГУ, 2019. С. 605–612.
4. Регламент диспетчерского управления движением поездов ОАО «РЖД» : распоряжение ОАО «РЖД» от 09.11.2009 г. № 2281р, в ред. распоряжений ОАО «РЖД» от 29.12.2009 г. № 2707р, от 18.06.2010 г. № 1308р, приказа ОАО «РЖД» от 01.10.2010 г. № 156. URL: <https://jd-doc.ru/2009/noyabr-2009/7226-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-09-11-2009-n-2281r> (дата обращения: 08.11.2019).
5. Вентцель Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология / 2-е изд., стер. Москва : Наука, 1988. 208 с.

References

1. Statute on system of the JSC Russian Railways information response on emergency situations [Polozhenie OAO «RZhD» na neshtatnye situatsii] : approved by the Order of the JSC Russian Railways dated 09.01.2017 No. 1. URL: <http://rly.su/ru/content> (access date: 01.11.2019).
2. Long-term development program of the JSC Russian Railways up to 2025 [Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo aktsionernogo obshhestva «Rossiyskie zheleznye dorogi» do 2025 goda] : Order of the Government of the Russian Federation dated 19.03.2019 No. 466-r. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?structure_id=704&layer_id=5104&referrlayer_id=5756&page5756_4417=3&id=7017 (access date: 23.10.2019).
3. Sirina N. F., Sisina O. A. Modeling of information exchange for emergency situations arose in transportation process on railway transport [Modelirovaniye informatsionnogo obmena dlya sluchaya voznikshikh neshtatnykh i chrezvychaynykh situatsiy vo vremya perevozochnogo protsesa na zheleznodorozhnom transporte] // Prospective technologies in transportation systems : proceedings of the XIV International research and practice conference, Orenburg, November 20–22, 2019 / Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation ; OSU. Orenburg : OSU, 2019. Pp. 605–612.
4. Rules of traffic dispatching in the JSC Russian Railways [Reglament dispetcherskogo upravleniya dvizheniem poezdov OAO «RZhD»] : Order of the JSC Russian Railways dated 09.11.2009 No. 2281r, in edition of orders of the JSC Russian Railways dated 29.12.2009 No. 2707r, dated 18.06.2010 No. 1308r, in edition of the Decree of the JSC Russian Railways dated 01.10.2010 No. 156. URL: <https://jd-doc.ru/2009/noyabr-2009/7226-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-09-11-2009-n-2281r> (access date: 08.11.2019).
5. Venttsel E. S. Operations research: tasks, principles, methodology [Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya] / 2nd edition, stereotype. Moscow : Science, 1988. 208 p.

Объем статьи 0,9 авторских листа

УДК 656.21.001.2

Хабибулла Туранович Туранов, доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика и теория механизмов и машин» Ташкентского государственного технического университета им. Ислама Каримова (ТГТУ), Ташкент, Республика Узбекистан,

Ядгор Озодович Рузметов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ), Ташкент, Республика Узбекистан,

Оксана Викторовна Молчанова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Жамол Алишерович Шихназаров, ассистент кафедры «Транспортная логистика и сервис» Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ), Ташкент, Республика Узбекистан

О КРЕПЛЕНИИ ГРУЗА НА ВАГОНЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ

Khabibulla Turanovich Turanov, DSc in Engineering, Professor, Theoretical Mechanics and the Theory of Mechanisms and Machines Department, Tashkent State Technical University named after Islam Karimov (TSTU), Tashkent, Republic of Uzbekistan,

Yadgor Ozodovich Ruzmetov, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Carriage Department, Tashkent Railway Engineering Institute (TashREI), Tashkent, Republic of Uzbekistan,

Oksana Viktorovna Molchanova, PhD in Engineering, Associate Professor, Stations, Junctions and Freight Work Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Zhamol Alisherovich Shikhnazarov, Assistant Lecturer, Transport Logistics and Services Department, Tashkent Railway Engineering Institute (TashREI), Tashkent, Republic of Uzbekistan

On fastening of freight in cars at action of transverse forces

Аннотация

На основе проведенных исследований доказано, что расчеты по действующей методике не обеспечивают прочность креплений груза при воздействии поперечных сил. Методика, во-первых, не учитывает усилия предварительных скруток проволоки крепления, увеличивающие силу сцепления груза с полом вагона, и, во-вторых, не учитывает сдвиги груза, происходящие в процессе перевозки. Усилия во всех проволочных креплениях при воздействии поперечных сил в зависимости от геометрии крепления имеют одно и то же значение, что не соответствует действительности и является одним из основных недостатков существующей методики расчета.

Ключевые слова: железная дорога, вагон, проволочные крепления, поперечные силы, усилия в проволочных креплениях, некорректность существующей методики расчета.

Summary

On the basis of the research it is proved that the calculations according the existing method don't provide the strength of freight strapping at action of transverse forces. Firstly, the method doesn't consider forces of the preliminary lay-up of strapping wires that increase the adhesion force of freight and car floor and, secondly, doesn't take into consideration freight shifts that occur in transportation process. Forces in wire strapping at action of transverse forces depending on geometry of strapping have the same values, which doesn't correspond to reality and is one of the main drawbacks of the existing method of calculating freight strapping.

Keywords: railway, car, wire strapping, transverse forces, forces in wire strapping, incorrectness of the existing calculation method.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-23-29

Проблемы, связанные с расчетами крепления грузов на железнодорожном транспорте, общеизвестны [1–23]. Некорректность формул, приведенных в нормативно-технических документах [19, 20] и предназначенных для расчета гибких элементов крепления, обсуждалась в [12–17, 21, 23]. В частности, было отмечено, что в [19] отсутствуют понятия сдвига поперек вагона (т.е. $\Delta y \neq 0$), усилия предварительных скруток проволоки ($R_{0i} \neq 0$) и усилия в проволочных креплениях различного расположения ($R_i \neq 0$).

Для исключения ситуаций, создающих угрозу безопасности движения грузовых поездов, и обеспечения сохранности перевозимых на открытом подвижном составе грузов необходимы корректные методики по расчету крепления грузов.

В статье приведен пример решения технической проблемы расчета крепления конкретного груза, перевозимого на железнодорожной платформе, представляющей, на наш взгляд, практический интерес для транспортной науки.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Доказать, что при расчетах проволочных креплений груза на вагоне в действующих нормативно-технических документах не учитывается влияние: предварительных усилий креплений (которым подвергается каждое из них в процессе подготовки груза к отправке), сдвига груза в процессе перевозки и, как следствие, удлинения в проволочных креплениях; отметить необходимость использования новой методики расчета по размещению и креплению грузов на вагоне [14–18, 23].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования опираются на основной закон динамики относительного движения [6, 14–18].

В качестве примера рассматриваются расчеты усилий в гибких элементах крепления лебедки ЛП-152, установленной на железнодорожной платформе (рис. 1).

Погрузка запроектирована на 4-осную универсальную железнодорожную платформу с деревянным или деревометаллическим полом шириной полосы не более 1100 мм. Груз установлен на пол платформы без смещения центра тяжести от поперечной оси платформы.

Продольные и поперечные силы, приходящиеся на груз в процессе транспортировки, воспринимаются:

в продольном направлении — 6 парами растяжек R_1-R_6 (по 2 пары из проволоки диаметром 6 мм в 8 нитей в каждом направлении) и брусками 10–12 (см. рис. 1);

в поперечном направлении — 5 растяжками R_1-R_5 и $R_{1p}-R_{5p}$ в каждом из направлений и брусками 13 и 14 (см. рис. 1), прибитыми к полу платформы 6 гвоздями К6×200 каждый.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Вычисление сил, воспринимаемых упругими и упорными элементами крепления, по формулам, приведенным в [14, 15], применяя MathCAD, изложим в следующей последовательности.

1. Расчет переносных сил инерции, воспринимаемых упругими элементами крепления груза.

Переносная сила инерции I_{ey} воздействующая на элементы крепления поперек вагона [14, 15], кН:

$$I_{ey} = k_{\text{д.}y} G, \quad (1)$$

где $k_{\text{д.}y} = a_{ey}/g$ — коэффициент поперечной динамики вагона в долях от g ; $a_{ey} = 0,52g$ — переносное ускорение вагона поперек вагона ($0,46 \div 0,55$), м/с^2 ; G — сила тяжести груза, кН.

При принятых значениях $a_{ey} = 0,52g$, $k_{\text{д.}y} = a_{ey}/g = 0,52$ и $G = 450$ кН:

$$I_{ey} = k_{\text{д.}y} G = 0,52 \cdot 450 = 234 \text{ кН.}$$

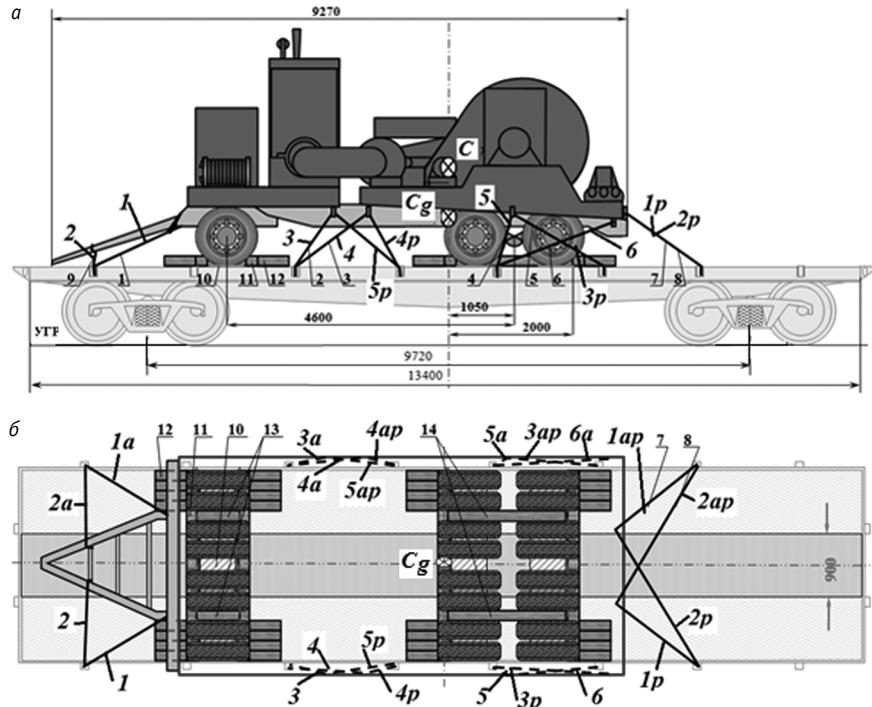


Рис. 1. Схема размещения и крепления груза на платформе:

а — вид спереди; б — вид сверху; 1—6а, 1р—6р, 1ар—6ар — соответственно номера упругих элементов крепления одного, другого и обоих направлений; 7—9 — то же, что и 1р, 2р, 1ар, 2ар, 2 и 2а; 10—14 — бруски

Вертикальная переносная сила инерции I_{ez} воспринимаемая упругими элементами крепления [14, 15], кН:

$$I_{ez} = k_{\text{д.}z} G, \quad (2)$$

где $k_{\text{д.}z} = a_{ez}/g$ — коэффициент вертикальной динамики вагона в долях от g ; $a_{ez} = 0,62g$ — переносное ускорение вагона по вертикали ($0,46 \div 0,66$), м/с^2 .

При исходных данных $a_{ez} = 0,62g$, $k_{\text{д.}z} = a_{ez}/g = 0,62$ и $G = 450$ кН:

$$I_{ez} = k_{\text{д.}z} G = 0,62 \cdot 450 = 279 \text{ кН.}$$

2. Определение ветровой нагрузки [6, 12, 14, 15, 19, 20], кН:

$$F_{\text{в}} = 0,5 A_{\text{нав}}. \quad (3)$$

Здесь 0,5 — коэффициент, учитывающий наветренную поверхность груза, $\text{kН}/\text{м}^2$; $A_{\text{нав}}$ — площадь наветренной поверхности груза, м^2 , которая определяется по формуле

$$A_{\text{нав}} = k_c 10^{-6} \cdot 2 \cdot H \cdot 2 \cdot L, \quad (4)$$

где k_c — коэффициент, учитывающий сплошность наветренной поверхности груза, м^2 ; $2 \cdot H$ — высота груза, м; $2 \cdot L$ — длина груза, м.

Принимая $k_c = 0,65$; $2 \cdot L = 9,27 \cdot 10^3$; $2 \cdot H = 3,332 \cdot 10^2$; $c = 0,96$; $\rho_{\text{в}} = 1,29$; $v_{\text{в}} = 28,4$ и подставля в (3) и (4), получим:

$$A_{\text{нав}} = 0,65 \cdot 10^{-6} \cdot 3,332 \cdot 10^2 \cdot 9,27 \cdot 10^3 = 20,077 \text{ м}^2;$$

$$F_{\text{в}} = 0,5 \cdot 20,077 = 10,04 \text{ кН}$$

(формула (11) в [18]).

3. Определение силы трения при сцеплении груза с полом вагона и при скольжении груза относительно пола вагона (см. формулу (3.10) в [14]), кН:

$$F_{\text{тр.сц.}y} = f_{\text{сц}} G (1 - k_{\text{д.}z}), \quad (5)$$

где $f_{\text{сц}}$ — коэффициент трения при сцеплении (обычно «металла о дерево», $f_{\text{сц}} = 0,45$); f — коэффициент трения при скольжении (обычно $f = 0,7 f_{\text{сц}}$).

При исходных данных $f_{\text{сц}} = 0,45$, $k_{\text{д.}z} = 0,62$ и $G = 450$:

$$F_{\text{тр.сц.}y} = 0,45 \cdot 450 \cdot (1 - 0,62) = 76,95 \text{ кН.}$$

4. Вычисление «сдвигающей» силы поперек вагона [14, 15], кН:

$$F_{\text{сд.}y} = k_6(I_{ey} - F_{\text{в}}), \quad (6)$$

где k_6 — коэффициент безопасности (или устойчивости от опрокидывания), обычно $k_6 = 1,25$ [24, с. 81].

При заданных исходных данных $k_6 = 1,25$, $I_{ey} = 234$ и $F_{\text{в}} = 10$:

$$F_{\text{сд.}y} = F_y = 1,25(234 + 10) = 305,034 \text{ кН.}$$

5. Определение «сдвигающей» силы, воспринимаемой упругими элементами крепления груза поперек вагона, при учете силы трения сцепления и скольжения (см. формулу (3.19) в [14]), кН:

$$\Delta F_{\text{сц.}y} = F_{\text{сд.}y} - F_{\text{тр.сц.}y}. \quad (7)$$

Подставляя $F_{\text{сд.}y} = 305,034$, $F_{\text{тр.сц.}y} = 76,95$, получаем:

$$\Delta F_{\text{сц.}y} = 305,034 - 76,95 = 228,084 \text{ кН.}$$

6. Вычисление реакции упорных брусков (см. формулу (47) [18]):

$$R_{\text{бр.}y} = k_1 n_{\text{кр.}y} n_{\text{бр.}y} [R_{\text{кр}}], \quad (8)$$

где $k_1 = 0,6$ — коэффициент прочности крепления упорных брусков (обычно принимают $0,5 \div 0,8$); $n_{\text{кр.}y} = 14$ и $n_{\text{бр.}y} = 4$ — количество крепежных изделий (гвоздя) и упорных брусков, принятых согласно схеме размещения и крепления груза на вагоне (см. рис. 1), шт.; $[R_{\text{кр}}] = 1,08$ — допускаемое значение силы, воспринимаемое одним крепежным изделием (см. табл. 32 [19, 20]), кН.

Подставляя исходные данные в формулу (8), получим:

$$R_{\text{бр.}y} = 0,6 \cdot 14 \cdot 4 \cdot 1,08 = 36,288 \text{ кН.}$$

7. Определение поперечной силы $\Delta F_{\text{бр.сц.}y}$, воспринимаемой средствами крепления груза без учета упругих сил и сил трения от предварительных скруток проволоки, но с учетом реакции упорных брусков $R_{\text{бр.}y}$ только одного направления согласно формуле [14, 15]

$$\Delta F_{\text{бр.сц.}y} = \Delta F_{\text{сд.}y} - R_{\text{бр.}y}. \quad (9)$$

Подставляя исходные данные, рассчитанные по формулам (7) и (8), в (9), получим, кН:

$$\Delta F_{\text{бр.сц.}y} = 228,084 - 36,288 = 191,796.$$

Как видно, здесь явно произойдет поперечный сдвиг груза. В этом случае упорные бруски потеряют связь с деревянным полом вагона.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА УСИЛИЙ В КРЕПЛЕНИЯХ ГРУЗА ПО СУЩЕСТВУЮЩЕЙ МЕТОДИКЕ [19, 20]

Усилия (т.е. внутренние силы) в креплениях груза как одного, так и другого направления при воздействии поперечных сил определим по формулам (см. формулу (40) в [19, 20]), которые для удобства расчета нами представлены в следующем виде:

$$R_{ky} = \frac{\Delta F_{\text{бр.сц.}y}}{c} (k = 1, 2; c \in \{a, b\}), \quad (10)$$

где $\Delta F_{\text{бр.сц.}y}$ — продольная сила, воспринимаемая упругими и упорными элементами крепления [см. формулу (9), где $\Delta F_{\text{бр.сц.}y} = 191,796$ кН]; a и b — безразмерные постоянные числа, которые определяются через заданные значения физико-геометрических параметров проволочных креплений в виде:

$$a = \left(f_{\text{сц}} \cdot \frac{h_i}{l_i} + \frac{b_i}{l_i} \right) + \left(f_{\text{сц}} \cdot \frac{h_{ip}}{l_{ip}} + \frac{b_{ip}}{l_{ip}} \right), \quad (i = 1, 6); \quad (11)$$

$$b = \left(f_{\text{сц}} \cdot \frac{h_{ia}}{l_{ia}} + \frac{b_{ia}}{l_{ia}} \right) + \left(f_{\text{сц}} \cdot \frac{h_{iap}}{l_{iap}} + \frac{b_{iap}}{l_{iap}} \right). \quad (12)$$

Здесь h_i , b_i и l_i ; h_{ip} , b_{ip} и l_{ip} ; h_{ia} , b_{ia} и l_{ia} , h_{iap} , b_{iap} и l_{iap} — рассчитанные по данным чертежа значения проекций упругих элементов крепления как одного, так и другого направления соответственно на вертикальную и поперечную ось вагона и длина этих креплений, м.

Для рассматриваемого примера эти геометрические параметры креплений сведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры креплений, м

Обозначение элементов крепления	Элементы крепления одного и другого направления	Величина проекций элементов креплений и их длина, м					
		h_i	b_i	l_i	h_{ip}	b_{ip}	l_{ip}
Одного направления	h_i	0,605	0,302	0,907	0,907	0,907	0,907
	b_i	0,608	1,043	0,174	0,174	0,174	0,174
	l_i	1,467	1,087	1,06	1,432	0,952	12,078
	h_{ip}	1,008	1,008	0,907	0,907	0,907	0
	b_{ip}	0,869	1,912	0,174	0,174	0,174	0
	l_{ip}	1,786	2,515	1,662	1,06	1,292	0
Другого направления	h_{ia}	0,605	0,302	0,907	0,907	0,907	0,907
	b_{ia}	1,095	1,043	0,174	0,174	0,174	0,174
	l_{ia}	1,497	1,087	1,06	1,432	0,952	2,078
	h_{iap}	1,008	1,008	0,907	0,907	0,907	0
	b_{iap}	0,869	1,912	0,174	0,174	0,174	0
	l_{iap}	1,851	2,515	1,662	1,06	1,292	0

Здесь диаметр проволоки крепления и количество нитей в них приняты равными $d = 6$ мм и $n = 8$ шт.



Оговоримся, что вывод формулы (40) в [19, 20] общеизвестен [12, с. 133–134].

Подставляя данные табл. 1 в формулы (11) и (12) с учетом того что $f_{\text{сц}} = 0,45$, получим:

$$a = \left[\left(0,45 \cdot \frac{0,605}{1,467} + \frac{0,608}{1,467} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,605}{1,786} + \frac{0,869}{1,786} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,302}{1,087} + \frac{1,043}{1,087} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,302}{2,515} + \frac{1,912}{2,515} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,907}{1,06} + \frac{0,174}{1,06} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,907}{1,662} + \frac{0,174}{1,662} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,907}{1,432} + \frac{0,174}{1,432} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,907}{1,06} + \frac{0,174}{1,06} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,907}{0,952} + \frac{0,174}{0,952} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,907}{1,292} + \frac{0,174}{1,292} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,907}{2,078} + \frac{0,174}{2,078} \right) \right] = 6,564;$$

$$b = \left[\left(0,45 \cdot \frac{0,605}{1,467} + \frac{1,095}{1,467} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{1,008}{1,851} + \frac{0,869}{1,851} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,302}{1,087} + \frac{1,043}{1,087} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{1,008}{2,515} + \frac{1,912}{2,515} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,907}{1,06} + \frac{0,174}{1,06} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,907}{1,662} + \frac{0,174}{1,662} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,907}{1,432} + \frac{0,174}{1,432} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,907}{1,06} + \frac{0,174}{1,06} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,907}{0,952} + \frac{0,174}{0,952} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,907}{1,292} + \frac{0,174}{1,292} \right) + \left(0,45 \cdot \frac{0,907}{2,078} + \frac{0,174}{2,078} \right) \right] = 6,537.$$

Подставляя полученные значения безразмерных постоянных чисел a и b в формулу (10) и учитывая несимметричность расположения элементов крепления относительно поперечной оси как *одного*, так и *другого* направления, получим, кН:

$$R_{1y} = \frac{\Delta F_{\text{бр.сц.y}}}{a} = \frac{191,796}{6,564} = 29,22;$$

$$R_{2y} = \frac{\Delta F_{\text{бр.сц.y}}}{b} = \frac{191,796}{6,537} = 29,34.$$

Как видно, усилия во всех гибких упругих элементах крепления груза как *одного*, так и *другого* направления при воздействии поперечных сил, *независимо* от различных значений геометрических параметров крепления (см. табл. 1), *имеют одно и то же значение*, что не соответствует действительности. Это подтверждает некорректность существующей методики расчета крепления грузов [19, 20] для оценки безопасности перевозочного процесса, поскольку вычисления в ней проводятся без учета усилий предварительных скруток проволочных креплений, которым подвергаются эти крепления в процессе подготовки груза к отправке. Кроме того, по суще-

ствующей методике прочность упругих элементов крепления с диаметром $d = 6$ мм и количеством нитей $n = 8$ шт. не обеспечена, так как усилия в креплениях больше, чем допустимое значение ($R_{\text{доп8}} = 24,8$ кН).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА УСИЛИЙ В КРЕПЛЕНИЯХ ГРУЗА ПО ФОРМУЛАМ ПРИЛОЖЕНИЯ 3 [1, 19, 20]

Будем учитывать, что коэффициент трения сцепления $f_{\text{сц}} = 0,45$, $\Delta F_{\text{бр.сц.y}} = 191,796$ кН [см. формулу (9)]. Кроме того, отметим, что формулы Приложения 3 [19, 20] являются частным случаем формул для расчета усилий в креплениях груза при воздействии поперечных сил, выведенных в [14].

Усилия в проволочных креплениях при воздействии поперечных сил как одного, так и другого направления выполним по формуле (3) Приложения 3 в [19, 20]:

$$R_{iy} = Z_{ky} \cdot \frac{n_i}{l_i} \cdot \frac{b_i}{l_i}; R_{ipy} = Z_{ky} \cdot \frac{n_{ip}}{l_{ip}} \cdot \frac{b_{ip}}{l_{ip}}; \quad (13)$$

$$R_{iay} = Z_{ky} \cdot \frac{n_{ia}}{l_{ia}} \cdot \frac{b_{ia}}{l_{ia}};$$

$$R_{iapy} = Z_{ky} \cdot \frac{n_{iap}}{l_{iap}} \cdot \frac{b_{iap}}{l_{iap}} (k = 1, 2; i = 1, 6), \quad (14)$$

где Z_{ky} определяются по формуле (4) Приложения 3 в [19, 20]:

$$Z_{ky} = \frac{\Delta F_{\text{бр.сц.y}}}{C0_{ky}} (k = 1, 2; C0_{ky} \in \{C0_{\text{сц.1y}}, C0_{\text{сц.2y}}\}). \quad (15)$$

Здесь $\Delta F_{\text{бр.сц.y}}$ — поперечная сила, действующая на упругие и упорные элементы крепления [см. формулу (9)]; $C0_{\text{сц.1y}}$ и $C0_{\text{сц.2y}}$ — дополнительные параметры упругих элементов крепления, имеющие размерность 1/м.

Определим дополнительные параметры упругих элементов крепления вдоль вагона $C0_{\text{сц.y}}$ при коэффициенте трения сцепления по формулам, полученным из формулы (4) Приложения 3 в [19, 20]:

$$C0_{\text{сц.1y}} = \sum_{i=1}^{n_p} \frac{n_i}{l_i} \cdot \left(f_{\text{сц}} \cdot \frac{h_i}{l_i} + \frac{b_i}{l_i} \right) \cdot \frac{b_i}{l_i} + \sum_{i=1}^{n_p} \frac{n_{ia}}{l_{ia}} \cdot \left(f_{\text{сц}} \cdot \frac{h_{ia}}{l_{ia}} + \frac{b_{ia}}{l_{ia}} \right) \cdot \frac{b_{ia}}{l_{ia}}; \quad (16)$$

$$C0_{\text{сц.2y}} = \sum_{i=1}^{n_p} \frac{n_i}{l_i} \cdot \left(f_{\text{сц}} \cdot \frac{h_{ip}}{l_{ip}} + \frac{b_{ip}}{l_{ip}} \right) \cdot \frac{b_{ip}}{l_{ip}} + \sum_{i=1}^{n_p} \frac{n_{ip}}{l_{ip}} \cdot \left(f_{\text{сц}} \cdot \frac{h_{iap}}{l_{iap}} + \frac{b_{iap}}{l_{iap}} \right) \cdot \frac{b_{iap}}{l_{iap}}. \quad (17)$$

Отметим, что здесь геометрические параметры креплений имеют такие же значения, что приведены в табл. 1.

Подставляя исходные данные из табл. 1 в формулы (16) и (17) при $f_{\text{сц}} = 0,45$, $d_i = 6$ мм, $n_i = 8$ шт., получаем, 1/м:



$$\begin{aligned}
 C0_{\text{сц.1}y} = & \left(\frac{8}{1.467} \left(0.45 \cdot \frac{0.605}{1.467} + \frac{0.608}{1.467} \right) \frac{0.608}{1.467} + \right. \\
 & + \frac{8}{1.786} \left(0.45 \cdot \frac{0.605}{1.786} + \frac{0.869}{1.786} \right) \frac{0.869}{1.786} + \\
 & + \frac{8}{1.087} \left(0.45 \cdot \frac{0.302}{1.087} + \frac{1.043}{1.087} \right) \frac{1.043}{1.087} + \\
 & + \frac{8}{2.515} \left(0.45 \cdot \frac{0.302}{2.515} + \frac{1.912}{2.515} \right) \frac{1.912}{2.515} + \\
 & + \frac{8}{1.06} \left(0.45 \cdot \frac{0.907}{1.06} + \frac{0.174}{1.06} \right) \frac{0.174}{1.06} + \\
 & + \frac{8}{1.662} \left(0.45 \cdot \frac{0.907}{1.662} + \frac{0.174}{1.662} \right) \frac{0.174}{1.662} + \\
 & + \frac{8}{1.432} \left(0.45 \cdot \frac{0.907}{1.432} + \frac{0.174}{1.432} \right) \frac{0.174}{1.432} + \\
 & + \frac{8}{1.06} \left(0.45 \cdot \frac{0.907}{1.06} + \frac{0.174}{1.06} \right) \frac{0.174}{1.06} + \\
 & + \frac{8}{0.952} \left(0.45 \cdot \frac{0.907}{0.952} + \frac{0.174}{0.952} \right) \frac{0.174}{0.952} + \\
 & + \frac{8}{1.292} \left(0.45 \cdot \frac{0.907}{1.292} + \frac{0.174}{1.292} \right) \frac{0.174}{1.292} + \\
 & \left. + \frac{8}{2.078} \left(0.45 \cdot \frac{0.907}{2.078} + \frac{0.174}{2.078} \right) \frac{0.174}{2.078} + 0 \right) = 11,894; \\
 \\
 C0_{\text{сц.2}y} = & \left(\frac{8}{1.467} \left(0.45 \cdot \frac{0.605}{1.467} + \frac{1.095}{1.467} \right) \frac{1.095}{1.467} + \right. \\
 & + \frac{8}{1.851} \left(0.45 \cdot \frac{1.008}{1.851} + \frac{0.869}{1.851} \right) \frac{0.869}{1.851} + \\
 & + \frac{8}{1.087} \left(0.45 \cdot \frac{0.302}{1.087} + \frac{1.043}{1.087} \right) \frac{1.043}{1.087} + \\
 & + \frac{8}{2.515} \left(0.45 \cdot \frac{1.008}{2.515} + \frac{1.912}{2.515} \right) \frac{1.912}{2.515} + \\
 & + \frac{8}{1.06} \left(0.45 \cdot \frac{0.907}{1.06} + \frac{0.174}{1.06} \right) \frac{0.174}{1.06} + \\
 & + \frac{0.174}{1.662} \left(0.45 \cdot \frac{0.907}{1.662} + \frac{0.174}{1.662} \right) \frac{0.174}{1.662} + \\
 & + \frac{8}{1.432} \left(0.45 \cdot \frac{0.907}{1.432} + \frac{0.174}{1.432} \right) \frac{0.174}{1.432} + \\
 & + \frac{8}{1.06} \left(0.45 \cdot \frac{0.907}{1.06} + \frac{0.174}{1.06} \right) \frac{0.174}{1.06} + \\
 & + \frac{8}{0.952} \left(0.45 \cdot \frac{0.907}{0.952} + \frac{0.174}{0.952} \right) \frac{0.174}{0.952} + \\
 & + \frac{8}{1.292} \left(0.45 \cdot \frac{0.907}{1.292} + \frac{0.174}{1.292} \right) \frac{0.174}{1.292} + \\
 & \left. + \frac{8}{2.078} \left(0.45 \cdot \frac{0.907}{2.078} + \frac{0.174}{2.078} \right) \frac{0.174}{2.078} \right) = 12,016.
 \end{aligned}$$

Подставляя полученные значения в формулу (15), имеем, кН·м:

$$Z_{y1} = \frac{\Delta F_{\text{бр.сц.}y}}{C0_{\text{сц.}y1}} = \frac{191,796}{11,894} = 16,126;$$

$$Z_{y2} = \frac{\Delta F_{\text{бр.сц.}y}}{C0_{\text{сц.}y2}} = \frac{191,796}{12,016} = 15,961.$$

Результаты вычислений усилий в элементах креплений груза по формулам (13) и (14) с учетом расчетных данных, полученных по формулам (9), (15)–(17), сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты вычисления усилий в элементах креплений груза как одного, так и другого направления, кН

Обозначения усилий в креплениях	Элементы крепления одного и другого направления	Значение усилий, кН					
		$\frac{R_{1y}}{R_{1yp}}$	$\frac{R_{2y}}{R_{2yp}}$	$\frac{R_{3y}}{R_{3yp}}$	$\frac{R_{4y}}{R_{4yp}}$	$\frac{R_{5y}}{R_{5yp}}$	$\frac{R_{6y}}{R_{6yp}}$
$\frac{R_{1y}}{R_{1yp}}$	Одного направления	26.89	84.05	14.72	8.06	18.23	3.83
		25.3	28.76	5.96	14.72	9.91	0
$\frac{R_{iay}}{R_{iapy}}$	Другого направления	27.16	84.92	14.87	8.15	18.42	3.87
		24.39	29.06	6.87	14.87	10.01	0

Отсюда ясно, что при воздействии поперечных сил прочность первой и второй пары упругих элементов крепления как одного, так и другого направления не обеспечена: усилия в креплениях больше, чем допустимое (24,8 кН), особенно во второй паре — превышают допустимое более чем в 3 раза ($84/24,8 \approx 3,5$), в результате чего можно ожидать их разрушение в процессе перевозки груза. В остальных проволочных креплениях усилия оказались меньше допустимого. Прочность таких креплений обеспечена.

ВЫВОДЫ

1. Приведена последовательность расчета поперечных сил, воспринимаемых проволочными креплениями груза, и определены усилия в данных креплениях (на примере лебедки ЛП-152) по существующей методике [1, 6, 19, 20].

2. Результаты расчетов по существующей методике показали, что прочность некоторых элементов крепления с диаметром $d = 6$ мм и количеством нитей $n = 8$ шт. не обеспечена — превышает допустимое значение более чем в 3 раза. Это объясняется тем, что методика [19, 20], во-первых, не учитывает усилие предварительных скруток проволоки крепления R_0 ,

увеличивающее силу сцепления груза с полом вагона (оцениваемую коэффициентом трения сцепления), во-вторых, не учитывает, что в процессе перевозки происходят сдвиги груза (оцениваемые коэффициентом трения скольжения). Выполненные расчеты показали, что усилия во всех проволочных креплениях при воздействии поперечных сил независимо от геометрии крепления имеют одно и то же значение [см. формулу (11)], что не соответствует действительности и является одним из основных недостатков существующей методики [19, 20].

3. Результаты расчета усилий во всех проволочных креплениях при воздействии поперечных сил в зависимости от гео-

метрии крепления, выполненные по формулам Приложения 3 [1, 19, 20] (см. табл. 2), имеют различные значения, что соответствует действительности и является одним из основных достоинств существующей методики. Однако и этот метод расчета не учитывает усилие предварительных скруток проволоки крепления. Кроме того, по существующей методике также не представляется возможным прогнозировать сдвиг груза по перек вагона Δu и удлинение каждого упругого элемента крепления Δl в соответствии с геометрией.

4. В перспективе для расчета размещения и крепления грузов должна использоваться новая методика [13, 14].

Литература

1. Зылев В. Б. Вычислительные методы в нелинейной механике конструкций : монография. Москва : Инженер, 1999. 145 с.
2. Equipment for Rational Securing of Cargo on Railway Wagons / N. Anderson, P. Anderson, R. Bylander et al. // VINNOVA Report/Rapport VR 2004:05. URL: // <http://www.vinnova.se/upload/EPiStorePDF/vr-04-05.pdf> (дата обращения: 10.01.2020).
3. Marten J., Andersson P. Equipment for Efficient Cargo Securing and Ferry Fastening of Vehicles. URL: <http://www.nvfnorden.org/lisalib/getfile.aspx?itemid=1593> (дата обращения: 10.01.2020).
4. Driver's Handbook Cargo Securement. A Guide to the North American Cargo Securement Standard. URL: http://www.highwaystar-magazine.com/images/Driver_Handbook.pdf (дата обращения: 10.01.2020).
5. European Best Practice Guidelines on Cargo Securing for Road Transport. URL: http://ec.europa.eu/transport/roadsafety/vehicles/best_practice_guidelines_en.htm (дата обращения: 10.01.2020).
6. Комаров К. Л., Яшин А. Ф. Теоретическая механика в задачах железнодорожного транспорта : монография. Новосибирск : Наука, 2004. 296 с.
7. Priddy J. D., Jones R. A. Experimental Determination of the Effect of Cargo Variations on Roll Stability // SAE Int. J. Commer. Veh. 6(2) : 308–314, 2013, <https://doi.org/10.4271/2013-01-2359>.
8. Billing J. R. Industry Practices for Loading and Securing Cargo in Vans and other Closed Trucks. Ontario Trucking Association, Spring. 2006.
9. Balsom M., Wilson F. R., Hildebrand E. Impact of Wind Forces on Heavy Truck Stability // Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, January 2006. DOI: 10.1177/0361198106196900116.
10. Load Securement for Palletized Freight in Closed Trucks // The Science of Preventing Freight Damage. January. 2007. 50 p.
11. Vertical cylinder handling and transportation. AIGA 038/06. URL: http://asiaiga.org/uploaded_docs/AIGA%20038_06%20Vertical%20cylinder%20handling%20and%20transportation_reformatted%20Jan%202012.pdf (дата обращения: 10.01.2020).
12. Туранов Х. Т., Бондаренко А. Н., Власова Н. В. Крепление грузов в вагонах : учебное пособие. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2006. 286 с.
13. Timukhina E. N. Mathematical modelling of fastening with cargoes displacement transverse wagon // Transport Problems. 2008. Vol. 3. Issue 3. Pp. 65–68.

References

1. Zylev V. B. Calculation methods in nonlinear structural mechanics [Vychislitel'nye metody v nelineynoy mekhanike konstruktsiy] : monograph. Moscow : Engineer, 1999. 145 p.
2. Equipment for Rational Securing of Cargo on Railway Wagons / N. Anderson, P. Anderson, R. Bylander et al. // VINNOVA Report/Rapport VR 2004:05. URL: // <http://www.vinnova.se/upload/EPiStorePDF/vr-04-05.pdf> (access date: 10.01.2020).
3. Marten J., Andersson P. Equipment for Efficient Cargo Securing and Ferry Fastening of Vehicles. URL: <http://www.nvfnorden.org/lisalib/getfile.aspx?itemid=1593> (access date: 10.01.2020).
4. Driver's Handbook Cargo Securement. A Guide to the North American Cargo Securement Standard. URL: http://www.highwaystarmagazine.com/images/Driver_Handbook.pdf (access date: 10.01.2020).
5. European Best Practice Guidelines on Cargo Securing for Road Transport. URL: http://ec.europa.eu/transport/roadsafety/vehicles/best_practice_guidelines_en.htm (access date: 10.01.2020).
6. Komarov K. L., Yashin A. F. Theoretical mechanics in railway transport tasks [Teoreticheskaya mekhanika v zadachakh zheleznodorozhnogo transporta] : monograph. Novosibirsk : Science, 2004. 296 p.
7. Priddy J. D., Jones R. A. Experimental Determination of the Effect of Cargo Variations on Roll Stability // SAE Int. J. Commer. Veh. 6(2) : 308–314, 2013, <https://doi.org/10.4271/2013-01-2359>.
8. Billing J. R. Industry Practices for Loading and Securing Cargo in Vans and other Closed Trucks. Ontario Trucking Association, Spring. 2006.
9. Balsom M., Wilson F. R., Hildebrand E. Impact of Wind Forces on Heavy Truck Stability // Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, January 2006. DOI: 10.1177/0361198106196900116.
10. Load Securement for Palletized Freight in Closed Trucks // The Science of Preventing Freight Damage. January. 2007. 50 p.
11. Vertical cylinder handling and transportation. AIGA 038/06. URL: http://asiaiga.org/uploaded_docs/AIGA%20038_06%20Vertical%20cylinder%20handling%20and%20transportation_reformatted%20Jan%202012.pdf (access date: 10.01.2020).
12. Turanov Kh. T., Bondarenko A. N., Vlasova N. V. Strapping of goods in cars [Kreplenie gruzov v vagonakh] : textbook. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2006. 286 p.
13. Timukhina E. N. Mathematical modelling of fastening with cargoes displacement transverse wagon // Transport Problems. 2008. Vol. 3. Issue 3. Pp. 65–68.
14. Turanov Kh. T. Theoretical mechanics in special tasks on cargo transportation [Teoreticheskaya mekhanika v spetsial'nykh zadachakh gruzovikh perevozok] : monograph. Novosibirsk : Science, 2009. 376 p.
15. Turanov Kh. T. Interaction of open top rolling stock with solid-state freight [Vzaimodeystvie otkrytogo podvizhnogo sostava i tverdotel'nogo gruzu] : textbook. Moscow : UMTs ZhDT, 2011. 374 p.

14. Туранов Х. Т. Теоретическая механика в специальных задачах грузовых перевозок : монография. Новосибирск : Наука, 2009. 376 с.
15. Туранов Х. Т. Взаимодействие открытого подвижного состава и твердотельного груза : учебное пособие. Москва : УМЦ ЖДТ, 2011. 374 с.
16. Turanov Kh. Analytical investigation of cargo motion lengthwise the wagon under the action of plane force system // Global Journal of Research in Engineering (GJRE-A). 2013. Vol. 13. Issue X. Version 1.0. Pp. 7–16.
17. Turanov Kh. Mathematical modeling of cargo motion crosswise the wagon under the action of plane force system // Science and Technology. 2015. Vol. 5. No. 1. Pp. 5–14. doi: 10.5923/j.scit.20150501.02. ID: 104000126.
18. Туранов Х. Т., Псеровская Е. Д. Расчет продольного сдвига груза цилиндрической формы и усилия в элементах крепления при вариации количества крепежных элементов // Транспорт Урала. 2013. № 3 (38). С. 16–23. ISSN 1815–9400.
19. Приложение 14 к СМГС «Правила размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах». Москва : Планета, 2008. 191 с.
20. Приложение 3 к СМГС «Технические условия размещения и крепления грузов». URL: <http://osjd.org/doco/public/ru> (дата обращения: 10.01.2020).
21. Гордиенко А., Тимухина Е. Технологические аспекты перевозок автотехники в вагонах : монография. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 176 с.
22. Туранов Х. Т., Рузметов Я. О., Якушев А. В. О деформируемом состоянии механической системы «груз – вагон – крепление» // Известия ПГУПС. 2019. Т. 16. № 3. С. 455–468. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-455-468. ISSN 1815–588X.
23. Turanov Kh., Ruzmetov Ya., Vlasova N. Calculating cargo securing elements on a railway platform under the impact of a spatial force system // E 3S Web of Conferences 135, 02006. (2019). ITESE 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913502006>.
24. Яблонский А. А., Никифорова В. М. Курс теоретической механики. Санкт-Петербург : Лань, 1998. 768 с.
16. Turanov Kh. Analytical investigation of cargo motion lengthwise the wagon under the action of plane force system // Global Journal of Research in Engineering (GJRE-A). 2013. Vol. 13. Issue X. Version 1.0. Pp. 7–16.
17. Turanov Kh. Mathematical modeling of cargo motion crosswise the wagon under the action of plane force system // Science and Technology. 2015. Vol. 5. No. 1. Pp. 5–14. doi: 10.5923/j.scit.20150501.02. ID: 104000126.
18. Turanov Kh. T., Pserovskaya E. D. Calculation of cylindrical freight longitudinal shift and fastening elements tractions with variation of fasteners quantity [Raschet prodol'nogo sdviga gruda tsilindrcheskoy formy i usiliya v elementakh krepleniya pri variatsii kolichestva krepezhnykh elementov] // Transport of the Urals. 2013. No. 3 (38). Pp. 16–23. ISSN 1815–9400.
19. Annex 14 to SMGS «Rules for loading and securing cargo in wagons and containers» [Prilozhenie 14 k SMGS «Pravila razmeshheniya i krepleniya gruzov v vagonakh i konteynerakh»]. Moscow : Planet, 2008. 191 p.
20. Annex 3 to SMGS «Specifications for loading and securing cargo» [Prilozhenie 3 k SMGS «Tekhnicheskie usloviya razmeshheniya i krepleniya gruzov»]. URL: <http://osjd.org/doco/public/ru> (access date: 10.01.2020).
21. Gordienko A., Timukhina E. Technological aspects of transportation of motor vehicles in cars [Tekhnologicheskie aspekty perevozok avtotehniki v vagonakh] : monograph. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 176 p.
22. Turanov Kh. T., Ruzmetov Ya. O., Yakushev A. V. On deformable state of the «cargo – wagon – fastening» mechanical system [O deformiruemom sostoyanii mekhanicheskoy sistemy «gruz – vagon – kreplenie»] // Proceedings of Petersburg Transport University. 2019. Vol. 16. No. 3. Pp. 455–468. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-455-468. ISSN 1815–588X.
23. Turanov Kh., Ruzmetov Ya., Vlasova N. Calculating cargo securing elements on a railway platform under the impact of a spatial force system // E 3S Web of Conferences 135, 02006. (2019). ITESE 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913502006>.
24. Yablonskiy A. A., Nikiforova V. M. A course for theoretical mechanics [Kurs teoretycheskoy mekhaniki]. St. Petersburg : Lan', 1998. 768 p.

Объем статьи 0,68 авторских листа

УДК 629.4.04

**Ольга Игоревна Бондаренко, аспирант кафедры «Подвижной состав железных дорог»
Брянского государственного технического университета (БГТУ), Брянск, Россия,**

**Дмитрий Яковлевич Антипин, кандидат технических наук, доцент, директор Учебно-научного института транспорта
Брянского государственного технического университета (БГТУ), Брянск, Россия,**

**Сергей Геннадьевич Шорохов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог»
Брянского государственного технического университета (БГТУ), Брянск, Россия**

ОЦЕНКА УРОВНЯ ТРАВМИРОВАНИЯ ПАССАЖИРОВ ВАГОНОВ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С БАГАЖОМ

**Olga Igorevna Bondarenko, postgraduate student, Rolling Stock of Railways Department,
Bryansk State Technical University (BSTU), Bryansk, Russia,**

**Dmitriy Yakovlevich Antipin, PhD in Engineering, Associate Professor, Director of the Educational
and Scientific Institute of Transport, Bryansk State Technical University (BSTU), Bryansk, Russia,**

**Sergey Gennadyevich Shorokhov, PhD in Engineering, Associate Professor, Rolling Stock of Railways Department,
Bryansk State Technical University (BSTU), Bryansk, Russia**

Assessment of passenger injuries level in emergency situations at interaction with baggage

Аннотация

Предложена методика, позволяющая прогнозировать уровень травмирования пассажиров при взаимодействии с багажом в аварийной ситуации. Разработаны компьютерные модели аварийных ситуаций, вызванных столкновением пассажирского состава с препятствием на пути в виде автомобиля и грузового вагона, а также опрокидыванием вагона на боковую стену. Модель исследуемого вагона дополнена элементами интерьера пассажирского салона, моделями антропометрических манекенов и ручной клади. Антропометрические манекены размещены на пассажирских сиденьях, ручная кладь представлена абсолютно твердыми телами, расположенным на багажных полках. По результатам моделирования аварийной ситуации получены значения критерии травмирования при взаимодействии пассажиров с багажом.

Ключевые слова: аварийная ситуация, пассажирский подвижной состав, безопасность, антропометрический манекен, багаж.

Summary

The paper proposes a method that allows forecasting a level of passenger injuries at interaction with baggage in emergency situations. The authors have created computer models of emergency situations that are caused by a collision of passenger rolling stock with an obstacle on a track in the form of a motorcar and a freight car, and by swinging of a car on a side wall. The model of the investigated car is supplemented by elements of passenger car interior, models of anthropometric dummies and baggage. The anthropometric dummies are located on passenger seats, the baggage is presented by rigid bodies that are located on parcel shelves. As a result, the authors have got the values of injury criteria at interaction of passengers with baggage.

Keywords: emergency situation, passenger rolling stock, safety, anthropometric dummy, baggage.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-30-34

Отечественная и мировая статистика последствий аварийных ситуаций на железнодорожном транспорте свидетельствует о том, что большинство травм пассажиры получают не из-за разрушения несущих конструкций подвижного состава, а вследствие взаимодействия с элементами интерьера вагона, с другими пассажирами и ручной кладью.

Следует отметить, что тяжесть полученных травм не всегда зависит от скорости движения состава в момент аварии, а в большей степени определяется сценариями развития аварийной ситуации [1]. Самые тяжелые последствия возникают из-за опрокидывания вагона на боковую стену, а также в результате его столкновения с железнодорожным подвижным составом. А чаще всего наблюдаются аварийные ситуации, вызванные столкновением железнодорожного состава с автомобилем на переезде [2].

В настоящее время наиболее распространен такой метод исследования безопасности пассажиров железнодорожного подвижного состава в аварийных ситуациях, как математическое моделирование с использованием объектно-ориентированных компьютерных моделей и верификацией полученных результатов данными натурных экспериментов [3]. Оценка уровня травмирования пассажиров производится с помощью компьютерных моделей натурных антропометрических манекенов [4].

Модели, применяемые в исследованиях, обладают различной степенью дискретизации сценария развития аварийной ситуации, однако их общей чертой является то, что они не учитывают возможность травмирования пассажиров ручной кладью при ее падении со штатных мест размещения. В работах, посвященных оценке безопасности пассажиров в аварийных

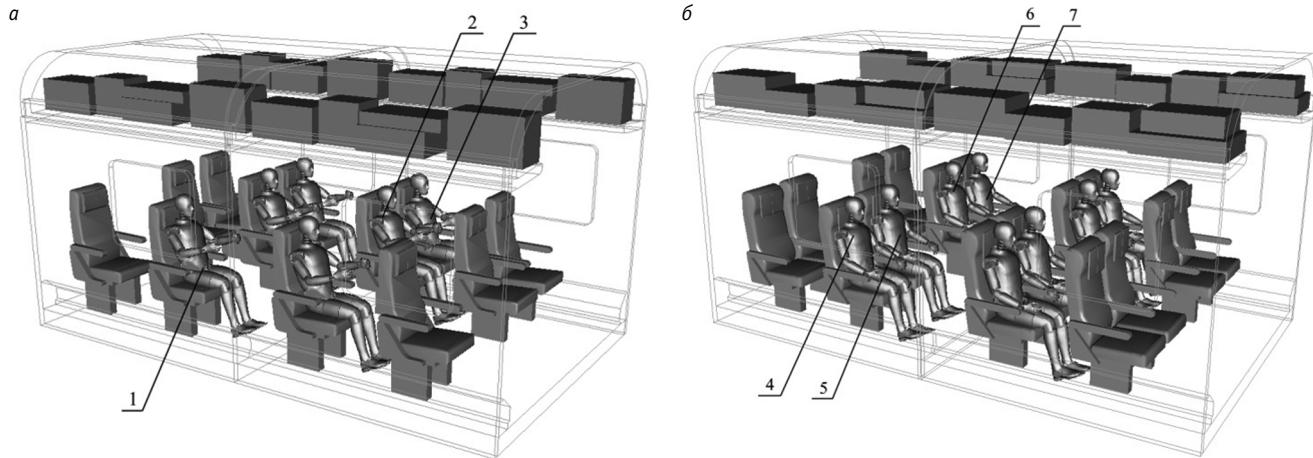


Рис. 1. Положение антропометрического манекена в пассажирских вагонах:

а — вагон с местами для сидения повышенной комфортности; б — вагон с местами для сидения стандартной планировки;
1–7 — рассматриваемые позиции манекена в салоне вагона

ситуациях на различных видах транспорта [5–7], ручная кладь, сместившаяся со штатных мест, рассматривается исключительно в виде препятствия для эвакуации пассажиров.

В связи с этим представляется целесообразным оценить степень воздействия ручной клади на уровень травмирования пассажиров при аварийных ситуациях.

В качестве объекта исследования выбран отечественный пассажирский вагон модели 61-4458 с сиденьями двух типов планировки — типовой и повышенной комфортности.

Рассмотрены такие сценарии аварийной ситуации: столкновение железнодорожного состава, состоящего из шестисекционного электропоезда постоянного тока ЭП2К и четырех пассажирских вагонов модели 61-4458, с препятствием в виде автомобиля массой 10 т на скорости 72 км/ч и грузовым свободно стоящим вагоном массой 80 т при скорости в момент соударения 36 км/ч. В процессе соударения на всех колесных парах железнодорожного состава формируются усилия, соответствующие режиму экстренного торможения. Третий сценарий предусматривает опрокидывание одиночного пассажирского вагона на боковую стену.

В соответствии с методикой исследования для прогнозирования динамического воздействия на пассажиров использованы твердотельные динамические модели, разработанные в среде программного комплекса «Универсальный механизм» [8].

Кузовы подвижного состава и автомобиль представлены в модели в виде абсолютно твердых тел, имеющих инерциальные характеристики, соответствующие реальным конструкциям. Элементы ходовых частей вагонов и локомотива представлены совокупностью абсолютно твердых тел, взаимодействующих между собой посредством шарниров контактных и специальных силовых элементов. Для учета взаимодействия подвижного состава и препятствий между ними введены контактные элементы с соответствующими жесткостными и диссипативными характеристиками.

Оценка динамической нагруженности пассажиров производилась для первого после локомотива вагона. С этой целью модель вагона дополнена твердотельными моделями ан-

тропометрического манекена. Модели манекена располагались в креслах ряда, находящегося в середине вагона (рис. 1).

В исследовании использована разработанная ранее [9, 10] модель манекена Hybrid III 50th Percentile Male. Она представляет собой совокупность абсолютно твердых тел с реальными весовыми и геометрическими характеристиками, связанных между собой вращательными шарнирами с заданными упруго-диссипативными характеристиками, подобно суставам человеческого тела. Для описания кинематики движения частей тела человека в модели манекена введены ограничения поворота его составных элементов в соответствии с реальными возможностями суставов человека, а также учтена возможность контактного взаимодействия элементов манекена между собой при помощи набора специальных контактных элементов, позволяющих ограничить проникновение частей манекена друг в друга при их взаимном перемещении.

Модель вагона также дополнена твердотельными моделями ручной клади, расположенной на багажных полках [11]. Вес и геометрические размеры ручной клади приняты в соответствии с максимально допустимыми величинами, изложенными в «Правилах пассажирских перевозок во внутригосударственном сообщении» [12]. Вес единицы ручной клади составил 36 кг. Геометрический размер по сумме трех измерений равен 0,18 м. Взаимодействие моделей манекенов с элементами интерьера вагона и моделями ручной клади описывается введением соответствующих контактных элементов.

По результатам моделирования определены ускорения, растягивающие и сжимающие осевые усилия, а также изгибающие моменты, действующие на элементы манекенов. На их основе рассчитаны значения критериев травмирования головы (HIC), шеи (N_{ij}) и бедра (FFC) манекена [13]. Сценарии аварийных ситуаций смоделированы дважды: первый раз с использованием исходной модели (вариант 1), второй раз — с исключением возможности перемещения моделей ручной клади относительно полки (вариант 2). Для каждого из вариантов манекены в креслах размещались как по ходу, так и против движения состава. Результаты расчетов приведены в табл. 1.



Таблица 1

Результаты оценки травмирования пассажиров в аварийных ситуациях

Положение манекена (см. рис. 1)	Вариант модели	Направление посадки	Столкновение с автомобилем			Столкновение с вагоном			Опрокидывание		
			HIC	Nij	FFC	HIC	Nij	FFC	HIC	Nij	FFC
Вагон с местами для сидения повышенной комфортности											
1	№ 1	По ходу	65	0,15	1845	180	0,60	2475	384	1,11	6428
		Против хода	65	0,15	1845	180	0,61	2475			
	№ 2	По ходу	64	0,15	1843	179	0,58	2468	193	0,43	5062
		Против хода	65	0,14	1843	178	0,60	2467			
2	№ 1	По ходу	123	0,18	1792	152	0,53	2473	905	1,09	6837
		Против хода	797	1,01	1799	813	1,08	2473			
	№ 2	По ходу	52	0,16	1791	150	0,53	2470	449	0,60	6105
		Против хода	54	0,17	1791	151	0,53	2469			
3	№ 1	По ходу	68	0,15	1803	173	0,56	2474	925	1,32	7671
		Против хода	75	0,19	1804	175	0,59	2472			
	№ 2	По ходу	68	0,15	1803	172	0,56	2465	921	1,31	6974
		Против хода	68	0,14	1803	172	0,55	2461			
Вагон с местами для сидения стандартной планировки											
4	№ 1	По ходу	60	0,15	2165	194	0,53	2772	376	0,99	5473
		Против хода	65	0,17	2166	199	0,55	2770			
	№ 2	По ходу	59	0,16	2164	194	0,53	2764	194	0,44	4976
		Против хода	62	0,18	2164	195	0,54	2766			
5	№ 1	По ходу	60	0,15	2239	182	0,61	2778	934	1,24	6895
		Против хода	783	0,98	2240	805	1,06	2778			
	№ 2	По ходу	57	0,14	2238	181	0,61	2771	451	0,62	5844
		Против хода	60	0,15	2238	185	0,63	2773			
6	№ 1	По ходу	63	0,15	2272	162	0,51	2778	989	1,21	7230
		Против хода	780	0,99	2274	809	1,06	2779			
	№ 2	По ходу	63	0,15	2272	161	0,49	2769	519	0,78	6127
		Против хода	65	0,18	2272	165	0,51	2770			
7	№ 1	По ходу	79	0,15	2165	210	0,56	2772	965	1,34	6979
		Против хода	81	0,17	2166	216	0,57	2770			
	№ 2	По ходу	78	0,14	2164	209	0,54	2765	955	1,32	6345
		Против хода	79	0,14	2164	211	0,56	2765			

Анализ результатов моделирования показал, что для двух вариантов рассматриваемых планировок вагонов уровни травмирования различаются незначительно. Относительно сценариев аварийных ситуаций можно сделать выводы, что при столкновении вагона с препятствиями критерии травмирования также незначительно отличаются, при этом они выше для варианта столкновения состава с вагоном на путях. При опрокидывании вагона уровни травмирования для манекенов, расположенных на всех позициях, намного выше по всем критериям, чем при столкновении состава с препятствиями.

Сравнение результатов моделирования с учетом взаимодействия манекенов с телами, описывающими ручную кладь, и без учета взаимодействия позволяет сделать вывод, что ручная кладь практически не влияет на уровень травмирования манекенов, размещенных по ходу движения состава. Это объясняется ее падением по инерции на подголовники кресел. При размещении манекенов спиной по ходу движения наблюдается резкий рост уровня критериев травмирования.

В частности, при учете взаимодействия манекенов с ручной кладью установлено следующее:



для манекена, расположенного на позиции 2 (см. рис. 1), столкновение железнодорожного состава с автомобилем приводит к увеличению критерия травмирования головы НIC в 15 раз, критерия травмирования шеи Nij в 6 раз, столкновение с вагоном — соответственно в 5 и 2 раза;

для манекена, расположенного на позиции 5 (см. рис. 1), при столкновении состава с автомобилем критерий НIC увеличивается в 13 раз, критерий Nij в 7 раз, при столкновении с вагоном — соответственно в 4,5 и в 1,5 раза;

для манекена, расположенного на позиции 6 (см. рис. 1), при столкновении с автомобилем критерий НIC увеличивается в 12 раз, критерий Nij в 6,6 раза, при столкновении с вагоном — соответственно в 4,9 и в 2 раза.

Для остальных позиций наблюдается менее значительное увеличение критериев травмирования головы и шеи, что объясняется размещением пассажиров непосредственно под багажными полками.

Кроме того, моделирование столкновений позволило установить, что учет взаимодействия манекенов с ручной кладью не оказывает существенного влияния на критерии травмирования бедра FFC.

При моделировании опрокидывания вагона на боковую стену, учитывая взаимодействие манекена и ручной клади, получены следующие результаты:

для манекена, расположенного на позиции 1 (см. рис. 1), критерий травмирования головы НIC увеличивается в 2 раза, критерий травмирования шеи Nij в 2,5 раза;

для манекена, расположенного на позициях 2 и 5 (см. рис. 1), критерии НIC и Nij увеличиваются в 2 раза;

для манекена, расположенного на позиции 4 (см. рис. 1), критерии НIC и Nij увеличиваются в 2,3 раза;

для манекена, расположенного на позиции 6 (см. рис. 1), критерий НIC увеличивается в 1,9 раза, критерий Nij в 1,5 раза;

увеличение значений критерия травмирования бедра FFC варьируется в пределах 26 %.

При этом величины всех критериев находятся в допустимых пределах, что свидетельствует об отсутствии непосредственного риска летального исхода в результате развития сценария аварийной ситуации. Однако ряд значений находится на пороговых уровнях, что указывает на высокую вероятность получения серьезных травм.

В целом на основании полученных в результате проведенного исследования данных можно сделать вывод, что в аварийных ситуациях пассажиры вагонов салонного типа при взаимодействии с ручной кладью, расположенной на багажных полках, подвергаются опасности получения серьезных травм. Это, в свою очередь, предопределяет необходимость учитывать такое взаимодействие при моделировании аварийных ситуаций и разрабатывать конструктивные меры, направленные на снижение указанных рисков.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-2881.2018.8.

Литература

- Бедрин Л. М. Железнодорожная травма: лекция // Избранные лекции по судебной медицине (судебно-медицинская травматология). Ярославль : ЯГМИ, 1989. С. 73–84.
- Прочность подвижного состава при соударении // Железные дороги мира. 2000. № 4. С. 32–39. ISSN 0321–1495.
- Шорохов С. Г. Обоснование конструктивных решений системы пассивной безопасности пассажирских вагонов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Брянск, 2014. 147 с.
- Jacobsen K. M. Collision Dynamics Modeling of Crash Energy Management Passenger Rail Equipment / Tufts University. Medford/Somerville, USA, 2008. 182 p.
- Emergency Evacuation of Commercial Passenger Aeroplanes / N.J. Butcher, J.C. Barnett, T. Buckland, R. M. H. Weeks ; Royal Aeronautical Society. London, UK, 2018. 89 p.
- Markos S. H., Pollard J. K. Passenger Train Emergency Systems : Review of Egress Variables and Egress Simulation Models / U. S. Department of Transportation. Washington, USA. April 2013. 86 p.
- Passenger Train Emergency Systems: Development of Prototype railEXODUS Software for U. S. Passenger Rail Car Egress / E. R. Galea, D. Blackshields, K. M. Finney, D. P. Cooney ; U. S. Department of Transportation. Washington, USA. November 2014. 168 p.
- Требования по обеспечению безопасности железнодорожного пассажирского подвижного состава в аварийных ситуациях / Д. Я. Антипин, О. И. Бондаренко, С. Г. Шорохов, Д. А. Бонда-

References

1. Bedrin L. M. Railway injury [Zheleznodorozhnaya travma]: lection // Selected lections on forensic medicine (forensic-medicine trauma surgery). Yaroslavl : Yaroslavl State Medical University, 1989. Pp. 73–84.
2. Strength of rolling stock at collision [Prochnost' podvizhnogo sostava pri soudarenii] // Rail International. 2000. No. 4. Pp. 32–39. ISSN 0321–1495.
3. Shorokhov S. G. Substantiation of design solutions of passenger cars passive safety system [Obosnovanie konstruktivnykh resheniy sistemy passivnoy bezopasnosti passazhirskikh vagonov] : PhD in Engineering Thesis. Bryansk, 2014. 147 p.
4. Jacobsen K. M. Collision Dynamics Modeling of Crash Energy Management Passenger Rail Equipment / Tufts University. Medford/Somerville, USA, 2008. 182 p.
5. Emergency Evacuation of Commercial Passenger Aeroplanes / N.J. Butcher, J.C. Barnett, T. Buckland, R. M. H. Weeks ; Royal Aeronautical Society. London, UK, 2018. 89 p.
6. Markos S. H., Pollard J. K. Passenger Train Emergency Systems : Review of Egress Variables and Egress Simulation Models / U. S. Department of Transportation. Washington, USA. April 2013. 86 p.
7. Passenger Train Emergency Systems: Development of Prototype railEXODUS Software for U. S. Passenger Rail Car Egress / E. R. Galea, D. Blackshields, K. M. Finney, D. P. Cooney ; U. S. Department of Transportation. Washington, USA. November 2014. 168 p.
8. Requirements on safety of railway passenger rolling stock in emergency situations [Trebovaniya po obespecheniyu bezopasnosti zheleznodorozhnogo passazhirskogo podvizhnogo sostava v avariynykh situatsiyakh] / D. Ya. Antipin, O. I. Bondarenko, S. G. Shorokhov, D. A. Bon-



- ренко // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов. Т. 4. Технические и естественные науки / РГУПС. Ростов-на-Дону, 2019. С. 290–294.
9. Антипин Д. Я., Кобищанов В. В., Шорохов С. Г. Применение моделей антропометрических манекенов для оценки безопасности пассажирского подвижного состава // Наука и образование транспорту. 2015. № 1. С. 6–9.
 10. Antipin D. Ya., Shorokhov S. G., Bondarenko O. I. CAD/CAE-technologies application for assessment of passenger safety on railway transport in emergency // 2018 IOP Conference Series : Materials Science and Engineering 327(2),022007.
 11. Survey on standard weights of passengers and baggage / Z. Berdowski, F. N. van den Broek-Serle, J. T. Jetten et al. Zoetermeer, May 2009. 264 p.
 12. О правилах перевозки пассажиров во внутригосударственном сообщении. URL http://pass.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5116 (дата обращения: 17.11.2019).
 13. Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems / M. Kleinberger, E. Sun, R. Eppinger et al. September 1998. 120 p.

darenko // Transport: science, education, production : collection of scientific papers. Vol. 4. Engineering and natural sciences / RSTU. Rostov-on-Don, 2019. Pp. 290–294.

9. Antipin D. Ya., Kobishhanov V. V., Shorokhov S. G. Application of models of anthropometric dummies for assessment of passenger rolling stock safety [Применение моделей антропометрических манекенов для оценки безопасности пассажирского подвижного состава] // Science and education for transport. 2015. No. 1. Pp. 6–9.
10. Antipin D. Ya., Shorokhov S. G., Bondarenko O. I. CAD/CAE-technologies application for assessment of passenger safety on railway transport in emergency // 2018 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 327(2),022007.
11. Survey on standard weights of passengers and baggage / Z. Berdowski, F. N. van den Broek-Serle, J. T. Jetten et al. Zoetermeer, May 2009. 264 p.
12. Passenger Transport Rules [О правилах перевозки пассажиров во внутрисударственном сообщении]. URL http://pass.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5116 (access date: 17.11.2019).
13. Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems / M. Kleinberger, E. Sun, R. Eppinger et al. September 1998. 120 p.

Объем статьи 0,53 авторских листа

УДК 656.259

Григорий Анатольевич Черезов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Ришат Зинфирович Галинуров, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Кристина Васильевна Колесниченко, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СТД-МПК

Grigoriy Anatolyevich Cherezov, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Rishat Zinfirovich Galinurov, postgraduate student, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Kristina Vasilyevna Kolesnichenko, postgraduate student, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Application of signal processing methods in the STD-MPK technical diagnostic system

Аннотация

Для обеспечения круглогодичной транспортной доступности при реализации проекта «Северный широтный ход» необходимо учитывать не только сложные метеорологические условия региона, но также требования к организации технологических процессов управления движением поездов и контроля за состоянием технических средств на проектируемой железнодорожной линии. Использование единого комплекса микропроцессорных систем управления движением поездов позволяет создавать конфигурацию зон управления между станциями и осуществлять автоматический контроль и мониторинг технического состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики с помощью встроенного модуля СТД-МПК. Кроме того, система технического диагностирования дает возможность применять различные методы для цифровой обработки сигналов с последующим получением качественного признакового пространства.

Ключевые слова: СТД-МПК, системы железнодорожной автоматики и телемеханики, методы анализа, временной ряд, комплекс микропроцессорных систем.

Summary

For the provision of year round transport accessibility at realisation of the Northern Latitudinal Railway project it is necessary to consider not only difficult weather conditions of the region, but also the requirements to the organization of train operation and control of technical means condition on the designed railway line. The application of the integral complex of microprocessor systems of train dispatching allows creating a configuration of control areas between stations and realizing automatic control and monitoring of technical condition of railway automatics and telemechanics with the use of STD-MPK embedded module. Moreover, the system of technical diagnostics enables the application of various methods for digital processing of signals with the subsequent reception of qualitative feature space.

Keywords: STD-MPK, systems of railway automatics and telemechanics, analysis methods, time series, complex of microprocessor systems.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-35-38

Для эффективного функционирования инфраструктуры арктических территорий российского Севера и формирования единого железнодорожного транспортного пространства активно разрабатывается проект Северного широтного хода (СШХ) [1]. Благодаря реализации этого проекта будет обеспечена круглогодичная доступность транспортного обслуживания портов, что существенно повлияет на социально-экономическое и промышленное развитие региона.

При проектировании и строительстве объектов железнодорожной инфраструктуры в пределах СШХ необходимо учитывать сложные метеорологические условия и физико-географические процессы зимнего периода — температурный режим, промерзание почвы, характер залегания снежного покрова. Кроме того, следует пересмотреть основные требования к организации технологических процессов управления движением поездов и контроля за состоянием технических средств на проектируемой железнодорожной линии, а именно:

к использованию технологий управления с минимальным участием персонала и созданием единого диспетчерского центра управления перевозками;

к разработке технических решений систем железнодорожной автоматики и телемеханики, оптимально обеспечивающих живучесть, надежность, малообслуживаемость, восстанавливаемость, ремонтопригодность и техническую совместимость с объектами инфраструктуры СШХ.

Представляется целесообразной и реализация единого комплекса микропроцессорных систем управления

движением поездов (КМСУДП) на всем протяжении участка СШХ. При этом следует придерживаться унифицированной структуры системы централизации станций.

Один из возможных вариантов решения поставленной задачи — создание на участке СШХ комплекса микропроцессорных и релейно-процессорных систем МПК [2] (рис. 1), в том числе:

оборудование крупных опорных станций системой микропроцессорной централизации на базе микроЭВМ и программируемых контроллеров МПЦ-МПК;

оборудование промежуточных разъездов релейно-процессорной электрической централизацией стрелок и сигналов на базе микроЭВМ и программируемых контроллеров ЭЦ-МПК с усовершенствованной исполнительной релейно-контактной группой;

организация диспетчерского управления и контроля с помощью программируемых аппаратных средств системы диспетчерской централизации ДЦ-МПК;

использование систем технической диагностики и мониторинга объектов железнодорожной автоматики и телемеханики СТД-МПК.

С помощью МПЦ-МПК возможно удаленное управление малыми станциями на базе центральной вычислительной системы (ЦВС) и управление объектами на соседних разъездах с АРМ ДСП опор-



Рис. 1. Структурная схема перспективной КМСУДП

ной станции. Назначение аппаратуры ЦВС (рис. 2) — концентрация и обработка информации от различных уровней МПЦ-МПК, выработка на ее основе управляющих воздействий на аппаратуру СЦБ, расположенную и на опорной станции, и на удаленных разъездах.

Применение на разъездах релейно-процессорной электрической централизации ЭЦ-МПК-У позволит реализовать не только распределенное, но и централизованное управление движением поездов, так как ЭЦ-МПК-У представляет собой современную, открытую и наращиваемую систему, которая легко адаптируется к условиям конкретного полигона управления и корректируется при модернизации путевого развития и изменении технических решений на станциях и разъездах [3].

Использование в системах централизации единой микропроцессорной элементной базы обеспечит конфигурацию зон управления между станциями на базе системы ДЦ-МПК и реализацию функции линейного пункта диспетчерской центра-

лизации без дополнительных капитальных затрат. К тому же благодаря интегрированности систем МПК количество оборудования сокращается: вся информация, начиная от напольных устройств, иерархично собирается и передается на центральный пост. Следовательно, такая топология системы позволяет управлять с центрального поста любым разъездом.

Комплекс микропроцессорных систем МПК (МПЦ-МПЦ, ЭЦ-МПК, ДЦ-МПК) имеет встроенный модуль диагностики и мониторинга объектов железнодорожной автоматики и телемеханики СТД-МПК.

СТД-МПК выполнен на основе комплекса технических средств распределенных измерений, контроля и управления (КТС РИКУ) [4]. КТС РИКУ представляет собой согласованные и объединенные общим конструктивным исполнением модули промышленной автоматики, предназначенные для измерения аналоговых величин, контроля и управления дискретными объектами, передачи информации на компьютеры (контроллеры) по стандартному интерфейсу RS-485.

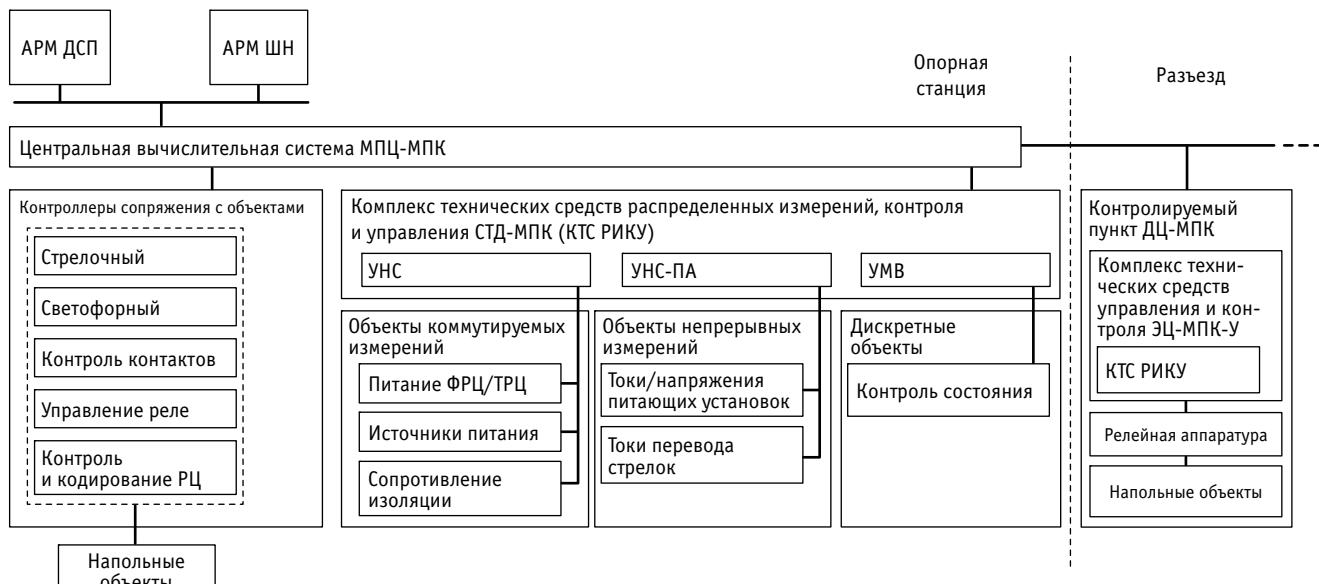


Рис. 2. Структурная схема системы МПЦ-МПК

Основные преимущества СТД-МПК:
минимальные капитальные вложения за счет максимального использования аппаратных и программных средств электрической или диспетчерской централизации ЭЦ-МПК-У, МПЦ-МПК;

автоматизация выполнения работ, связанных с измерением напряжения и фазы путевых реле, времени замедления на срабатывание сигнальных реле и пр.;

упрощение поиска отказов за счет непрерывного протоколирования информации по объектам контроля и телеметрий;

анализ логики работы электрической централизации.

В настоящее время системы мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры являются информационными [5]: они имеют одностороннюю связь с объектами диагностирования и с системами управления движением и собирают большие объемы диагностической информации. Для анализа последней организуются ситуационные центры мониторинга, но уровень автоматизации самого процесса анализа ввиду большого количества разрозненной и несистематизированной информации остается крайне низким.

Что касается СТД-МПК, то она относится к системам технической диагностики и мониторинга объектов станционной железнодорожной автоматики и телемеханики, является современной, легко адаптируемой и наращиваемой информационно-диагностической системой.

Система телеметрии СТД-МПК основана на двух подходах к вводу аналоговой информации. Например, измерение параметров питающих фидеров как элементов инфраструктуры, находящихся на разделении зон ответственности служб, производится непрерывным образом. А параметры напольных объектов, полюсов питания, сопротивления изоляции кабельных жил измеряются периодически коммутируемым образом.

При периодическом измерении фиксируемые величины в системе СТД-МПК представляют собой упорядоченную конечную последовательность значений — временной ряд $s = [s^{(1)}, \dots, s^{(t)}]$, который показан на рис. 3.

Известны [6] разнообразные методы обработки диагностической информации, в том числе в виде временных рядов.

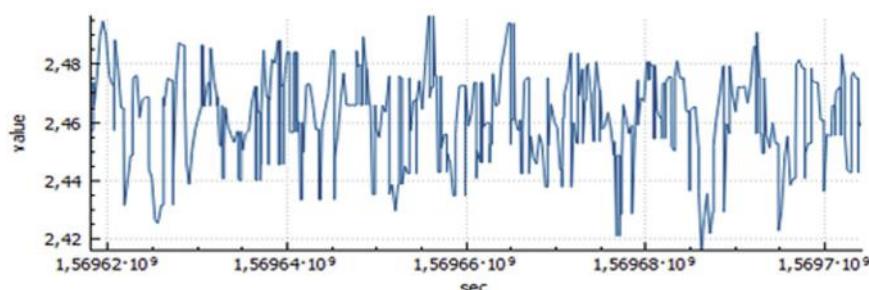


Рис. 3. Временной ряд изменения напряжения в системе СТД-МПК

дов. Рассмотрим методы анализа, основанные на вычислении преобразования Фурье и вейвлет-преобразования.

При использовании преобразования Фурье выборочный спектр процесса s определяется по формуле [7]

$$S(m) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n)e^{-j2\pi nm/N}, \quad (1)$$

где $s(n)$ — дискретная последовательность значений, полученных дискретизацией во временной области непрерывного сигнала $s(t)$.

Используя вейвлет-преобразование, временной ряд s представим в виде [8]

$$s(t_i) = \sum_{k=1}^{2^{N-M}} a_{m,k} \varphi_{m,k}(t_i) + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{2^{N-M}} d_{m,k} \psi_{m,k}(t_i), \quad (2)$$

где M — число уровней разложения; $a_{m,k}$ и $d_{m,k}$ — коэффициенты разложения; $\varphi_{m,k}$ и $\psi_{m,k}$ — масштабирующие и вейвлет-функции, определяемые следующим образом:

$$\varphi_{m,k}(t) = \sqrt{2^m} \varphi(2^m t - k);$$

$$\psi_{m,k}(t) = \sqrt{2^m} \psi(2^m t - k),$$

где $\sqrt{2^m}$ — нормирующий коэффициент; $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; m \in \mathbb{Z}$.

Используя систему MATLAB [9], вычислим коэффициенты Фурье и вейвлет-преобразования для данных, полученных из системы СТД-МПК (секция 12-20ПП) (рис. 4).

Спекtro- и скейлограммы для диагностических данных из системы СТД-МПК представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

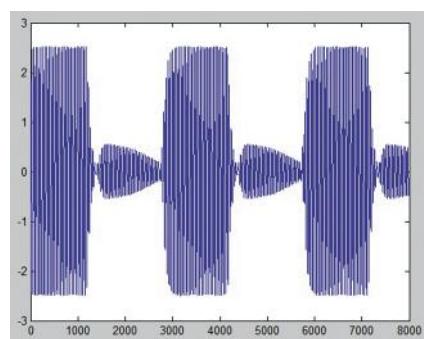


Рис. 4. Напряжение на входе путевого приемника

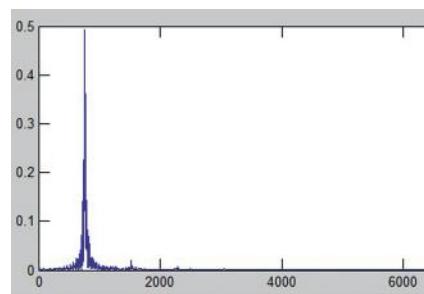


Рис. 5. Спектрограмма временного ряда

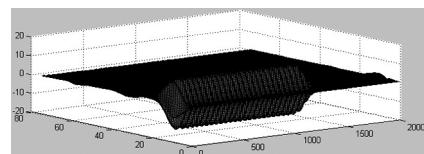


Рис. 6. Скейлограмма временного ряда

Как показывает анализ представленных спекtro- и скейлограмм, использование преобразований Фурье и вейвлет-преобразований позволяет определять локальные особенности сигналов. То есть эти методы можно применять для построения признакового пространства при диагностировании неисправностей аппаратурь железнодорожной автоматики и телемеханики.



Литература

- Плетнев С. Дорога на Север // Гудок. 2017. 30 янв. С. 1.
- Основы систем микропроцессорной централизации / А. Б. Никитин, М. Г. Яшин, В. А. Грошев, В. А. Мойсеев. Санкт-Петербург : Военный институт железнодорожных войск и военных сообщений, 2015. 79 с.
- Бушуев С. В. Проектирование устройств релейно-процессорной электрической централизации на базе микроЭВМ и программируемых контроллеров ЭЦ-МПК : методические указания. Екатеринбург : УрГУПС, 2009. 120 с.
- Средства технической диагностики и удаленного мониторинга СТД-МПК / А. Б. Никитин, С. В. Бушуев, К. В. Гундырев [и др.] // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 10. С. 6–8. ISSN 0005–2329.
- Черезов Г. А. Современное состояние диагностирования объектов инфраструктуры железнодорожной автоматики и телемеханики // Вестник транспорта Поволжья. 2017. № 2. С. 62–65. ISSN 1997–0722.
- Букреев В. Г., Колесникова С. И., Янковская А. Е. Выявление закономерностей во временных рядах в задачах распознавания состояний динамических объектов : монография. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 254 с.
- Черезов Г. А., Леушин В. Б., Кацюба О. А. Математическая постановка задачи технического диагностирования аппаратуры тональных рельсовых цепей // Транспортные интеллектуальные системы : сборник материалов I международной научно-практической конференции «Транспортные интеллектуальные системы — 2017» (TIS-2017), Санкт-Петербург, 16–17 февраля 2017 г. / Под ред. Вал. В. Сапожникова, Д. В. Ефанова. Санкт-Петербург : Изд-во ПГУПС, 2017. С. 81–86.
- Черезов Г. А., Попов А. Н. Построение признакового пространства из коэффициентов вейвлет-преобразования // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2017) : труды Международной научно-технической конференции / Под ред. С. А. Прохорова. Самара : Изд-во СамНЦ РАН, 2017. С. 834–838.
- Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. Москва : ДМК Пресс, 2009. 448 с.

References

- Pletnev S. Road to the North [Doroga na Sever] // Gudok. 2017. January, 30. P. 1.
- Basics of microprocessor interlocking systems [Osnovy sistem mikroprotsessornoy tsentralizatsii] / A. B. Nikitin, M. G. Yashin, V. A. Groshev, V. A. Moyseev. St. Petersburg : Military Institute of Railway Troops and Military Communications, 2015. 79 p.
- Bushuev S. V. Designing of relay-processor interlocking on the basis of microcomputers and ETs-MPK programmable controllers [Proektirovaniye ustroystv releyno-protsessornoy elektricheskoy tsentralizatsii na baze mikroEVM i programmiruemykh kontrollerov ETs-MPK] : guidelines. Ekaterinburg : USURT, 2009. 120 p.
- Means of STD-MPK technical diagnostics and remote monitoring [Sredstva tekhnicheskoy diagnostiki i udalennogo monitoringa STD-MPK] / A. B. Nikitin, S. V. Bushuev, K. V. Gundyrayev et al. // Automation, communication and informatics. 2012. No. 10. Pp. 6–8. ISSN 0005–2329.
- Cherezov G. A. Current state of diagnosis of railway infrastructure facilities of automation and telemechanics [Sovremennoe sostoyanie diagnostirovaniya ob"ektorov infrastruktury zheleznyodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki] // Bulletin of transport of the Volga region. 2017. No. 2. Pp. 62–65. ISSN 1997–0722.
- Bukreev V. G., Kolesnikova S. I., Yankovskaya A. E. Identification of regularities in time series in problems of recognition of dynamic objects conditions [Vyavlenie zakonomernostey vo vremennykh ryadakh v zadachakh raspoznavaniya sostoyaniy dinamicheskikh ob"ektorov] : monograph. Tomsk : Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2010. 254 p.
- Cherezov G. A., Leushin V. B., Katsyuba O. A. Mathematical statement of a problem of technical diagnostics of audio frequency track circuit devices [Matematicheskaya postanovka zadachi tekhnicheskogo diagnostirovaniya apparatury tonal'nykh rel'sovykh tsepey] // Transport intelligent systems : proceedings of the I International research and practice conference «Transport intelligent systems — 2017» (TIS-2017), St. Petersburg, February 16–17, 2017 / Ed. by Val. V. Sapozhnikov, D. V. Efanova. St. Petersburg : Publishing House of PSTU, 2017. Pp. 81–86.
- Cherezov G. A., Popov A. N. Creation of feature space out of coefficients of wavelet-transformation [Postroenie priznakovogo prostranstva iz koefitsientov veyvlet-preobrazovaniya] // Prospective information technologies (PIT-2017) : proceedings of the International scientific and technical conference / Ed. by S. A. Prokhorov. Samara : Publishing House of SamSC RAS, 2017. Pp. 834–838.
- Smolentsev N. K. Basics of wavelet theory. Wavelets in MATLAB [Osnovy teorii veyvletov. Veyvlety v MATLAB]. Moscow : DMK Press, 2009. 448 p.

Объем статьи 0,48 авторских листа

УДК 656.216.2

Антон Николаевич Попов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Сергей Юрьевич Гришаев, первый заместитель генерального директора — главный конструктор производственного объединения «Октябрь», Каменск-Уральский, Россия

БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ПРИ ОСТАНОВКЕ АВТОТРАНСПОРТА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕЕЗДАХ ПЕРЕД ПРИБЛИЖАЮЩИМСЯ ПОЕЗДОМ

Anton Nikolaevich Popov, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Sergey Yuryevich Grishaev, First Deputy of General Director — Chief Designer of the production association «Oktyabr», Kamensk-Uralsky, Russia

Safety of operation when motor vehicles stop at railway crossings in front of approaching train

Аннотация

Исследованы соотношения между длиной участков извещения переездной сигнализации и тормозными путями поездов. Установлено, что существующие методы расчета участков извещения автоматической переездной сигнализации (АПС) не гарантируют в случае необходимости остановку поезда торможением перед переездом после его закрытия. Сформулировано условие, при котором поезд может быть остановлен перед закрытым переездом, занятым автотранспортом. Выполнена проверка существующих систем АПС, и установлено, что они не соответствуют сформулированному условию, т.е. гарантированная остановка поезда не обеспечивается. Сделаны предложения по совершенствованию алгоритма работы АПС для обеспечения автоматической остановки поезда перед переездом, занятым автотранспортом. Показано, что развитие техники находится на уровне, достаточном для реализации данных предложений.

Ключевые слова: железнодорожный переезд, аварии на переездах, автоматическая переездная сигнализация, участок извещения, тормозной путь.

Summary

The paper shows investigations of relationship between the length of approach sections of level crossing safety installation and braking distances of trains. It is established that the existing methods of calculating approach sections of automatic level crossing safety installation don't guarantee, if necessary, a full stop of a train by braking before a crossing after its closure. The authors have formulated a condition when a train can be stopped before a closed crossing occupied by a motor vehicle. They have also carried out a verification of the existing automatic level crossing safety installation systems and established that such systems don't comply with the formulated condition, so the full stop of a train is not guaranteed. So, the authors have proposed measures on developing an algorithm of automatic level crossing safety installation operation for the control of automatic stop of a train before a crossing occupied by a motor vehicle. It is shown that the development of engineering is on a level sufficient for realization of this suggestions.

Keywords: railway crossing, accidents at crossings, automatic level crossing safety installation, approach section, braking distance.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-39-42

В области обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах сложилась тяжелая ситуация. Главная проблема железнодорожных переездов — высокая аварийность, большое количество случаев столкновения железнодорожного и автомобильного транспорта. Самой эффективной мерой предотвращения таких аварий считается ликвидация переездов и строительство на их месте путепроводов [1, 2], но она требует больших капитальных затрат. Сегодня неликвидированные переезды оборудуют устройствами автоматической переездной сигнализации (АПС), устройствами заграждения переездов (УЗП), системами фото- и видеофиксации нарушений. На переездах с наиболее интенсивным движением устанавливают заградительные светофоры, которыми управляют дежурные по переезду. Тем не менее, несмотря на предпринимаемые усилия, в 2018 г. на переездах, расположенных на сети ОАО «РЖД», произошло 259 дорожно-транспортных происшествий, в которых пострадало 175 чел.

Другая проблема, связанная с переездами, — занижение пропускной способности автодорог [2–6]. Расчетное время от закрытия переезда до прохода поезда определяется исходя из максимальной скорости движения поездов, установленной на участке. Поезд, который идет со скоростью ниже максимальной, приближается к переезду дальше, что приводит к излишнему простою автомобилей у закрытого шлагбаума.

Предложения по совершенствованию технических решений оборудования переездов направлены в основном на сокращение времени ожидания открытия переезда для автотранспорта, но проблема снижения аварийности гораздо более актуальна и требует проведения исследований и выработки решений.



Ряд аварий происходит после вынужденной остановки автотранспорта на переезде, когда поезд не успевает остановиться. Безотказность автомобиля при проследовании железнодорожного переезда не гарантируется. В качестве примера приведем случай, который произошел 6 октября 2017 г. во Владимирской области. Автобус, в котором находилось 58 чел., проезжал через железнодорожный переезд и заглох на путях. Дежурный по переезду незамедлительно включил заградительный сигнал. Со скоростью 90 км/ч приближался поезд. За 400 м до переезда машинист применил экстренное торможение, подал световые и звуковые сигналы. Экстренное торможение позволило снизить скорость, но не до полной остановки. Тормозной путь поезда составил около 746 м. В результате аварии погибло 17 чел.

В случае вынужденной остановки автотранспорта на переезде для предотвращения столкновения следует автоматически останавливать поезд, не давая ему выехать на переезд. Решение об остановке должно приниматься только после закрытия переезда для автомобильного транспорта.

Условие остановки поезда перед переездом заключается в том, что тормозной путь должен быть не более расстояния, оставшегося поезду до переезда:

$$S_t \leq l_{изв} - l_{закр}, \quad (1)$$

где S_t — тормозной путь поезда, м; $l_{изв}$ — длина участка извещения, м; $l_{закр}$ — расстояние, которое проходит поезд от передачи команды на закрытие до полного закрытия переезда для автотранспорта, м.

В существующих системах АПС при вступлении поезда на участок приближения подается команда на закрытие переезда. Переезд закрывается через 13–15 с после подачи команды за счет замедления на срабатывание аппаратуры АПС. Длина участка извещения определяется в соответствии с [7] по выражению

$$l_{изв} = \frac{v_{max} \cdot t_c^p}{3,6}, \quad (2)$$

где v_{max} — максимальная скорость движения поездов на участке, где расположен переезд, км/ч; t_c^p — расчетное время извещения, с.

Расчетное время извещения вычисляется следующим образом:

$$t_c^p = \frac{3,6(l_{пер} + l_{ЭК} + l_0)}{v_{ЭК}} + t_{пр} + t_r, \quad (3)$$

где $l_{пер}$ — ширина переезда, м; $l_{ЭК} = 24$ — максимальная длина экипажа (автомобиля), м; $l_0 = 5$ — расстояние от переездного светофора шлагбаума до линии остановки автотранспорта, м; $v_{ЭК} = 8$ — расчетная скорость автотранспорта, км/ч; $t_{пр}$ — время срабатывания приборов извещения и управления переездной сигнализацией, с; если в участок извещения входят импульсные (кодовые) рельсовые цепи, то $t_{пр} = 4$ с, иначе $t_{пр} = 2$ с; $t_r = 10$ — гаранитное время, с; 3,6 — коэффициент перевода км/ч в м/с.

Как видно из (2) и (3), длина участка извещения зависит от максимальной скорости движения поездов по переезду и ширины самого переезда и не зависит от характеристик подвижного состава и тормозного пути поездов, следующих через переезд.

Величина $l_{закр}$ определяется скоростью поезда при движении по участку извещения и временем замедления на срабатывание аппаратуры АПС. Значение $l_{закр}$ может быть определено по выражению

$$l_{закр} = \frac{v \cdot t_{зам}}{3,6}, \quad (4)$$

где $t_{зам}$ — замедление на срабатывание устройств АПС, с.

Рассмотрим случай, когда поезд движется с максимально допустимой скоростью $v = v_{max}$. Тогда условие (1) можно переписать в виде

$$S_t \leq \frac{v_{max} \cdot (t_c^p - t_{зам})}{3,6}. \quad (5)$$

Вычислим значения правой части неравенства (5) для переезда минимальной ширины и различных значений скорости движения и представим их в виде табл. 1. Время замедления на срабатывание аппаратуры АПС принято равным 15 с.

Выражения и методы определения пути торможения подвижного состава содержатся в [8, 9]. При вычислении тормозного пути методом интервалов скорости пути торможения складываются из подготовительного ($S_{п}$) и действительного (S_d):

$$S_t = S_{п} + S_d; \quad (6)$$

$$S_{п} = 0,278v_0t_{п}, \quad (7)$$

где v_0 — скорость, при которой начинается торможение, км/ч; $t_{п}$ — время подготовки тормозов к действию, с; 0,278 — коэффициент перевода км/ч в м/с.

Таблица 1

Расстояние между поездом и переездом после опускания шлагбаума

Ширина переезда, м	Время извещения, с	Расстояние между поездом и переездом после опускания шлагбаума (при движении с постоянной скоростью), м												
		Скорость движения поезда, км/ч												
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
11	30,0	83	125	167	209	250	292	334	375	417	459	500	542	584



Действительный путь торможения вычисляется как сумма путей, рассчитанных на малых интервалах скорости, и определяется по выражению

$$S_d = \sum \frac{500(v_h^2 - v_k^2)}{\zeta[w_{ox} + w_c + 1000\vartheta_p \Phi_{kp}]}, \quad (8)$$

где v_h — начальное значение скорости, км/ч; v_k — значение, до которого следует снизить скорость, км/ч; ζ — замедление поезда под действием удельной замедляющей силы, км/ч²; w_{ox} — основное удельное сопротивление движению поезда при холостом ходе локомотива, Н/т; $w_c = 9,81i$ — дополнительное удельное сопротивление движению от спрямленного профиля и плана, Н/т (i — уклон, %); Φ_{kp} — коэффициент трения колодок; ϑ_p — тормозной коэффициент поезда.

Путь торможения определяется характеристиками подвижного состава.

На основании выражений (5)–(8) запишем условие, при котором поезд сможет остановиться перед автотранспортом, задержавшимся на переезде после его закрытия:

$$0,278v_0t_n + \sum \frac{500(v_h^2 - v_k^2)}{\zeta[w_{ox} + w_c + 1000\vartheta_p \Phi_{kp}]} \leq \frac{v_{max} \cdot (t_c^p - t_{зам})}{3,6}. \quad (9)$$

Для облегчения расчетов в [8] составлены номограммы тормозных путей грузовых и пассажирских поездов при экстренном торможении в зависимости от тормозного коэффициента при различной крутизне спуска.

Решим графически неравенство (9): нанесем на номограммы тормозных путей для грузовых (рис. 1) и пассажирских (рис. 2) поездов значения расстояний между поездом и переездом после закрытия шлагбаума (см. табл. 1). Рассмотрим случай, когда отсутствует уклон участка, на котором расположен переезд. Тормозные колодки — чугунные. По условиям безопасности наименьшее значение тормозного коэффициента для грузовых поездов $\vartheta_p = 0,33$ при движении со скоростями до 90 км/ч, для пассажирских $\vartheta_p = 0,6$ при движении со скоростями до 120 км/ч.

Графическое решение неравенства (9) показывает следующее: остановка грузовых поездов перед переездом после его закрытия гарантировается только для скоростей движения не более 30 км/ч, остановка пассажирских поездов — для скоростей не более 60 км/ч. Ситуация, когда поезд после опускания шлагбаума на переезде не сможет остановиться в случае необходимости, вполне вероятна.

Для существующих АПС гарантированную остановку поезда перед переездом можно обеспечить за счет увеличения длины участков извещения или за счет снижения скорости движения поездов. В первом случае сокращается пропускная способность автодороги из-за увеличения времени закрытия шлагбаума, т.е. обостряется проблема простоя автотранспорта у закрытого переезда. Во втором случае уменьшается пропускная способность железной дороги. Возникает противоречие: в существующих системах АПС обеспечение безопасности движения (снижение вероятности столкновений) на переезде приводит

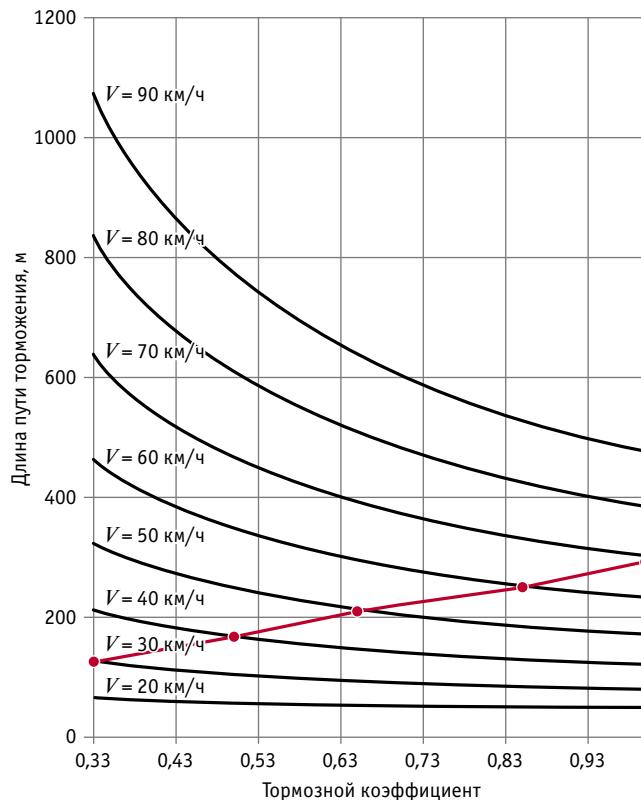


Рис. 1. Графическое решение неравенства (9) для грузовых поездов

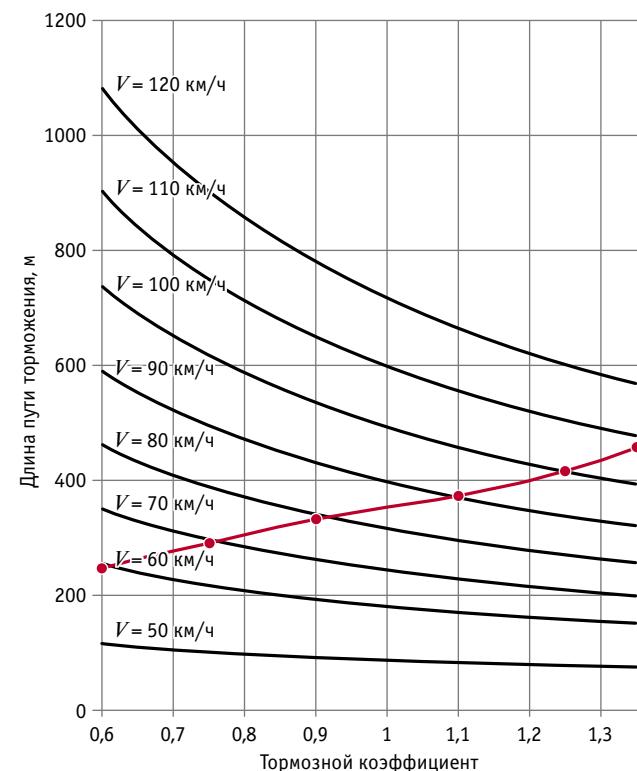


Рис. 2. Графическое решение неравенства (9) для пассажирских поездов

к ухудшению эксплуатационных характеристик (уменьшению пропускной способности) дорог, проходящих через переезд.

Выявленное противоречие может быть разрешено путем расчета длины участка извещения в зависимости от характеристик поезда и переезда для каждого конкретного случая. Современные бортовые локомотивные комплексы позволяют определять характеристики движущегося поезда в режиме реального времени [10–12]. Характеристики переезда, а также информация об исправности переездной аппаратуры и свободности переезда от автотранспорта могут быть переданы от АПС на движущийся локомотив по радиоканалу. Определить занятость переезда автотранспортом позволяют систе-

мы и методы, основанные на применении технического зрения, ультразвуковых и световых радаров. Алгоритмы расчета участка извещения и торможения поезда могут быть реализованы на аппаратно-программных средствах бортовых локомотивных комплексов.

Для снижения вероятности столкновения поездов с автотранспортом на железнодорожных переездах необходимо разработать технические решения, позволяющие управлять устройствами АПС в зависимости от характеристик приближающегося поезда, а также автоматически корректировать скорость движения поезда в случаях, когда после закрытия шлагбаумов автотранспорт не покинул переезд.

Литература

- Годяев А. И. Методологические основы и принципы построения систем поддержки принятия решений в задачах обеспечения безопасности управления движением на железнодорожном транспорте : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2006. 436 с.
- Тарасов Е. М., Железнов Д. В., Герус В. Л. Оценка эффективности существующей переездной сигнализации // Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 6 (54). С. 58–61. ISSN 1997–0722.
- Тарасов Е. М., Герус В. Л., Тарасова А. Е. Исследование информативности признаков при распознавании состояний рельсовых линий // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 191–207. ISSN 0236–2910.
- Устройство управления переездной сигнализацией / Р. В. Гнитко, А. А. Курганский, И. Г. Тильк, В. В. Ляной : патент 2544285 Российской Федерации. № 2013153989/11; заявл. 04.12.2013; опубл. 20.03.2015, Бюл. № 8.
- Тильк И. Г. Новые устройства автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2010. 167 с.
- Щиголев С. А. Автоматическая переездная сигнализация на счетчиках осей // Автоматика, связь, информатика. 2005. № 12. С. 57–58. ISSN 0005–2329.
- Методические указания по проектированию устройств автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте. И-276–00. Расчет параметров работы переездной сигнализации. URL: <http://static.scbist.com/scb/mu/I-276-00.pdf> (дата обращения: 11.12.2019).
- Правила тяговых расчетов для поездной работы : утв. распоряжением ОАО «РЖД» 12.05.2016 г. № 867р. 513 с.
- Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров ; под ред. И. П. Исаева. Москва : Транспорт, 1995. 294 с.
- Комплекс БЛОК: прорывные технологии в системах обеспечения безопасности движения / В. И. Головин, Е. Е. Шухина, В. В. Висков, А. С. Архипов // Локомотив. 2011. № 6. С. 28–31. ISSN 0869–8147.
- Розенберг Е. Н., Шухина Е. Е., Кисельгоф Г. К. Комплексные локомотивные системы безопасности // Автоматика, связь, информатика. 2014. № 10. С. 2–4. ISSN 0005–2329.
- Коваленко В. Н., Зайцев Д. Ю. Основные параметры и характеристики безопасного локомотивного объединенного комплекса БЛОК // Инновационный транспорт. 2014. № 1. С. 13–17. ISSN 2311–164X.

References

- Godyaev A. I. Methodological basics and principles of creating decision support system in tasks of train safety control on railway transport [Metodologicheskie osnovy i printsipy postroeniya sistem podderzhki prinyatiya resheniy v zadachakh obespecheniya bezopasnosti upravleniya dvizheniem na zheleznodorozhnom transporte] : DSc in Engineering Thesis. Moscow, 2006. 436 p.
- Tarasov E. M., Zheleznov D. V., Gerus V. L. Evaluation of existing level crossing signaling [Otseka effektivnosti sushhestvuyushhey pereezdnoy signalizatsii] // Bulletin of transport of the Volga region. 2015. No. 6 (54). Pp. 58–61. ISSN 1997–0722.
- Tarasov E. M., Gerus V. L., Tarasova A. E. Study of informative value of features in rail condition monitoring [Issledovanie informativnosti priznakov pri raspoznavanii sostoyaniy rel'sovykh liniy] // Mordovia University Bulletin. 2018. Vol. 28. No. 2. Pp. 191–207. ISSN 0236–2910.
- Device for level crossing safety installation control [Ustroystvo upravleniya pereezdnou signalizatsiye] / R. V. Gnitko, A. A. Kurganskiy, I. G. Tilk, V. V. Lyanoy : patent 2544285 Russian Federation No. 2013153989/11; filed 04.12.2013; publ. 20.03.2015, Bulletin No. 8.
- Tilk I. G. New devices of automation and telemechanics of railway transport [Novyye ustroystva avtomatiki i telemekhaniki zheleznodorozhnogo transporta]. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2010. 167 p.
- Shhigolev S. A. Automatic level crossing installation on axle counters [Avtomaticheskaya pereezdnaya signalizatsiya na schetchikakh osey] // Automation, communication and informatics. 2005. No. 12. Pp. 57–58. ISSN 0005–2329.
- Guidelines on designing automation, telemechanics and communications facilities on railway transport. I-276–00. Calculation of operation parameters of level crossing safety installation [Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu ustroystv avtomatiki, telemekhaniki i svyazi na zheleznodorozhnom transporte. I-276–00. Raschet parametrov raboty pereezdnoy signalizatsii]. URL: <http://static.scbist.com/scb/mu/I-276-00.pdf> (access date: 11.12.2019).
- Rules of grade computations for train operation [Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty] : approved by the Order of the JSC Russian Railways dated 12.05.2016 No. 867r. 513 p.
- Theory of electric traction [Teoriya elektricheskoy tyagi] / V. E. Rozenfeld, I. P. Isaev, N. N. Sidorov, M. I. Ozerov ; ed. by I. P. Isaev. Moscow : Transport, 1995. 294 p.
- Safety locomotive united complex: breakthrough technologies in systems of train safety control [Kompleks BLOK: proryvnye tekhnologii v sistemakh obe-spicheniya bezopasnosti dvizheniya] / V. I. Golovin, E. E. Shukhina, V. V. Viskov, A. S. Arkhipov // Locomotive. 2011. No. 6. Pp. 28–31. ISSN 0869–8147.
- Rosenberg E. N., Shukhina E. E., Kiselogf G. K. Integrated locomotive safety system [Kompleksnye lokomotivnye sistemy bezopasnosti] // Automation, communication and informatics. 2014. No. 10. Pp. 2–4. ISSN 0005–2329.
- Kovalenko V. N., Zaytsev D. Yu. Basic parameters and characteristics of safe integrated locomotive complex BLOCK [Osnovnye parametry i kharakteristiki bezopasnogo lokomotivnogo ob'edinennogo kompleksa BLOK] // Innotrans. 2014. No. 1. Pp. 13–17. ISSN 2311–164X.

УДК 65.01:658.5

Андрей Владимирович Пульяков, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия,

Роман Викторович Лихота, ведущий инженер Сервисного центра устройств автоматики и телемеханики — структурного подразделения ВСДИ — структурного подразделения ЦДИ — филиала ОАО «РЖД», Иркутск, Россия,

Владимир Александрович Алексеенко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия

УПРАВЛЕНИЕ ИНЦИДЕНТАМИ В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Andrey Vladimirovich Pultyakov, PhD in Engineering, Associate Professor, Automation, Telemechanics and Communications Department, Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, Russia,

Roman Victorovich Likhota, Principal Engineer, Service Centre of Automation and Telemechanics Facilities — Organization Department of the West-Siberian Infrastructure Directorate — Organization Department of the Central Infrastructure Directorate — a branch of the JSC Russian Railways, Irkutsk, Russia,

Vladimir Alexandrovich Alekseenko, PhD in Engineering, Associate Professor, Automation, Telemechanics and Communications Department, Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, Russia

Incident management in system of technical operation of microprocessor devices of railway automation and telemechanics

Аннотация

Статья посвящена вопросам управления инцидентами при технической эксплуатации микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики на сети ОАО «РЖД». В качестве объекта исследования рассматривается широко используемая микропроцессорная централизация (МПЦ) стрелок и сигналов типа EBILock 950, разработанная совместным российско-шведским предприятием ООО «Бомбардье Транспортейшн (Сигнал)». В результате проведенного анализа алгоритмов и схем взаимодействия эксплуатационного штата линейных предприятий и специалистов сервисных центров выявлен ряд недостатков в системе организации, обслуживания и ремонта МПЦ. Предложена альтернативная схема организации технической эксплуатации на основе разработанной авторами системы управления инцидентами, реализованной в виде веб-приложения. Приложение позволяет контролировать качество и сроки выполнения сервисных работ, накапливать информацию о методах устранения сложных нетиповых отказов и автоматизировать процесс обработки заявок сервисными центрами.

Ключевые слова: железнодорожная автоматика и телемеханика, микропроцессорные системы, техническая эксплуатация, сервисное обслуживание, инцидент, сложный отказ.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-43-47

Summary

The paper discusses the issues of incident management at technical operation of microprocessor systems of railway automation and telemechanics on the railway network of the JSC Russian Railways. The widely used microprocessor interlocking centralization of switches and signals (MPI) EBILock 950, the development of a joint Russian-Swedish company Bombardier Transportation (Signal), is considered as an object of the research. The analysis of algorithms and patterns of interaction between the operating staff of operating enterprises and specialists of service centres revealed a number of shortcomings in the system of the MPI maintenance and repair organization. As a result, the authors have proposed an alternative scheme for organizing the technical operation of microprocessor systems based on the incident management system implemented as a web application. This application makes it possible to monitor the quality and timing of service operations, accumulate information on methods for eliminating complex non-standard failures and automate the processing of requests by service centres.

Keywords: railway automation and telemechanics, microprocessor systems, technical operation, service, incident, complex failure.



ВВЕДЕНИЕ

Широкое внедрение микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), обеспечивающих безопасность и бесперебойность движения поездов на сети дорог России, а также ряда стран Европы и Азии, требует разработки новых подходов к организации их технической эксплуатации на всем протяжении жизненного цикла. В настоящее время в России порядка 70 % железнодорожных станций оборудованы различными микропроцессорными системами для централизации управления и контроля состояния наземных объектов [1].

Вопросам совершенствования системы технического обслуживания и ремонта устройств ЖАТ посвящено много работ, например [2–5]. Основное внимание в проводимых исследованиях уделяется традиционным устройствам и системам, особенно наземным объектам. Предлагаемые методики, базирующиеся на расчете надежности работы устройств и учете расходования ресурса их использования, адекватны и для наземных объектов, входящих в микропроцессорные системы ЖАТ.

На сети ОАО «РЖД» широко применяется микропроцессорная централизация стрелок и сигналов типа EBILock 950, разработанная ООО «Бомбардье Транспортейшн (Сигнал)» [6], доля которой составляет около 45 % от всех станционных систем ЖАТ, реализованных на микропроцессорной элементной базе. Рассмотрим на примере EBILock 950 организацию технической эксплуатации МПЦ железнодорожной автоматики, в основе которой лежит система управления инцидентами.

Пришедшая в 2017 г. на замену рассматриваемой системе микропроцессорная централизация стрелок и сигналов МПЦ-ЭЛ, разработанная и поставленная на производство специалистами ОАО «ЭЛТЕЗА», полностью отвечает идеологии управления инцидентами, однако опыт ее эксплуатации и статистика отказов в ней пока небольшие.

АНАЛИЗ СТАТИСТИКИ ОТКАЗОВ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

Для анализа отказов всех устройств микропроцессорной централизации стрелок и сигналов использовались статистические данные за 5 последних лет, характеризующие высокими темпами внедрения МПЦ и проявлением приработочных отказов. Каждый год прирост отказов по рассматриваемым устройствам составлял порядка 15–18 %.

Проведенный анализ отказов технических средств МПЦ EBILock 950 на сети дорог показал, что более 25 % от общего количества отказов, которые привели к задержкам поездов, являются сложными нетиповыми и повторяются на разных станциях. Установлено, что информация о таких отказах не обобщалась и корректирующих мероприятий для предотвращения их повторного появления не разрабатывалось. Системный характер этих отказов был также выявлен при вводе в эксплуатацию новых блоков и устройств МПЦ в разных дистанциях.

Вероятность возникновения подобных отказов на станциях разных дорог, эксплуатирующих аналогичные МПЦ, достаточно высока. Это подтверждается и исследованиями, результаты которых приведены в [7, 8].

К числу основных отказов устройств МПЦ относятся:

разрыв канала связи в системе передачи данных (в локальной сети системы) по причине некачественного монтажа коаксиального кабеля и применения креплений и разъемов низкой категории, не учитывающих специфические требования железнодорожного транспорта;

выход из строя процессорной платы объектного контроллера или интерфейсных плат стрелочных и светофорных объектных контроллеров в результате неисправности различных элементов печатных плат;

выход из строя устройств бесперебойного питания (УБП) по причине грозовых разрядов и перенапряжений.

По результатам проведенного анализа разработан классификатор технических средств МПЦ (рис. 1), в которых происходят отказы, т.е. выявлены элементы, являющиеся источниками отказов.

В дальнейшем классификатор позволит систематизировать отказы, приводящие систему МПЦ в неисправное состояние, по причинам и элементам, в которых они происходят.

СУЩЕСТВУЮЩАЯ СИСТЕМА ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ

Для гарантийного и послегарантийного технического обслуживания и ремонта устройств МПЦ в пределах одной или нескольких дорог на договорной основе функционируют специализированные сервисные центры (ССЦ) компании ООО «Бомбардье Транспортейшн (Сигнал)». Основная задача их деятельности — обеспечение надежной работы устройств МПЦ EBILock 950 и МПЦ-ЭЛ, а также других средств железнодорожной автоматики и телемеханики, выполненных с применением микропроцессорных средств. Техническая поддержка специалистами центра осуществляется в круглосуточном режиме с возможностью прибытия на объект для аварийно-восстановительных работ. Кроме того, в круг задач ССЦ входит техническое и технологическое обучение производственного персонала дистанций [2, 9, 10].

Для обеспечения взаимодействия эксплуатационного штата линейных предприятий со специализированными сервисными центрами в пределах каждой железной дороги создаются дорожные сервисные центры (ДСЦ) [11].

Несмотря на особую и большую роль ДСЦ и ССЦ в обеспечении надежной работы систем МПЦ, ответственность за безотказную работу микропроцессорных устройств несет эксплуатационный штат линейных предприятий, который решает не менее важную задачу ежедневного контроля и периодического технического обслуживания оборудования, расположенного удаленно от центра. В таких условиях решающее значение имеют глубокие знания аппаратной части, владение программными средствами, опыт технического обслуживания, умение выявлять и распознавать предотказное состояние устройств, а также самостоятельно и оперативно устранять сложные нетиповые отказы.

Изучение опыта эксплуатации МПЦ EBILock 950 и анализ алгоритмов взаимодействия сервисного центра ООО «Бомбардье Транспортейшн (Сигнал)» с работниками линейных предприятий показали, что главный недостаток существующей системы заключается в слабой кооперации эксплуатационного

штата линейных предприятий и специалистов ССЦ [12–14].

Были установлены три основные причины этой проблемы. Во-первых, ответы сервисного центра на запросы персонала линейных предприятий поступают несвоевременно и часто бывают неполными. Во-вторых, руководство линейных предприятий и дорожной службы не имеет эффективных инструментов для контроля этого взаимодействия. И, в-третьих, отсутствует информирование широкого круга пользователей о сложных нетиповых, но достаточно частых отказах, методах поиска причин их возникновения и способах устранения.

Таким образом, в результате того что вся необобщенная информация замыкается на конкретных специалистах дорожных сервисных центров, увеличивается нагрузка на ДСЦ в целом и появляется зависимость эксплуатационного штата линейных предприятий от сотрудников ССЦ.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНЦИДЕНТАМИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ

Предлагаемая система организации технической эксплуатации микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики на сети ОАО «РЖД» подразумевает взаимодействие сервисных центров и эксплуатационного персонала линейных предприятий через разработанное веб-приложение «Система управления инцидентами» [15, 16]. Оно создано на базе открытого серверного веб-приложения Redmine, предназначенного для управления проектами и задачами. Архитектура системы управления инцидентами показана на рис. 2.

В процессе разработки приложения были определены клиентские и административные связи. Для каждой станции с МПЦ EBILock 950 созданы клиентские страницы, их пользователи — старшие электромеханики линейных предприятий, в ведении которых находится конкретная станция. Администраторами, обслуживающими запросы пользователей, являются работники сервисных центров дорог. Создаваемые запросы на проведение технического обслуживания и устранение отказов заносятся в клиентские страницы станций и поступают на обработку администраторам ССЦ.

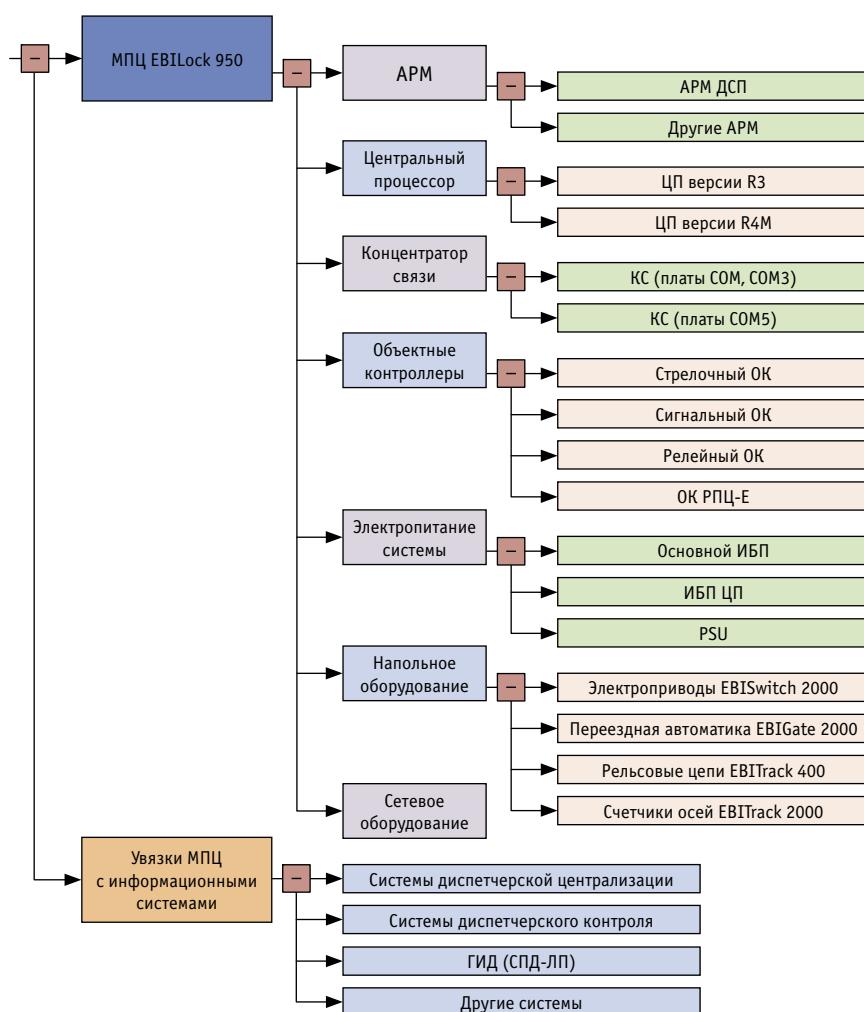


Рис. 1. Укрупненный классификатор технических средств МПЦ



Рис. 2. Архитектура системы управления инцидентами



При таком способе региональные специализированные сервисные центры компании ООО «Бомбардье Транспортейшн (Сигнал)» в рамках договорных отношений взаимодействуют с некоторыми дорожными сервисными центрами ОАО «РЖД».

Подаваемые запросы эксплуатационного штата через веб-приложение в ССЦ заносятся в базу данных, где они фиксируются как инциденты с указанием даты поступления запроса и присвоенного порядкового номера. Дата принятия запроса в работу специалистами сервисных центров и дата его выполнения также фиксируются в приложении. Далее из заявок по определенной тематике, которые имеют статус «выполнена», в среде веб-приложения формируется база данных, содержащая информацию о сложных нетиповых отказах устройств МПЦ EBILock 950 и методах их устранения.

Пример карточки обработанного сервисным центром запроса, содержащего все необходимые для дальнейшего использования признаки, представлен на рис. 3.

Чтобы техническому персоналу станций было удобно находить информацию, необходимую для устранения отказа или его прогнозирования и принятия корректирующих мероприятий, приложение оснащено системой фильтрации описанных инцидентов.

Для того чтобы руководство линейных предприятий и головной службы в целом могло контролировать не только качество взаимодействия технического персонала с дорожным сервисным центром и региональным сервисным центром ООО «Бомбардье Транспортейшн (Сигнал)», но также полное и своевременное оказание консультативной поддержки со стороны поставщика оборудования, приложение оснащено статистическим аппаратом контроля запросов.

Литература

1. Микропроцессорные системы централизации / Под ред. Вл. В. Сапожникова. Москва : УМЦ ЖДТ, 2006. 398 с.
2. Техническая эксплуатация устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики : учебное пособие / Вл. В. Сапожников, Л. И. Борисенко, А. А. Прокофьев, А. И. Каменев ; под ред. Вл. В. Сапожникова. Москва : Маршрут, 2003. 336 с.
3. Шаманов В. И., Пульяков А. В. Совершенствование системы технического обслуживания устройств автоматики // Автоматика, связь, информатика. 2008. № 12. С. 13–15. ISSN 0005–2329.
4. Володарский В. А. Принципы выбора стратегий обслуживания технических устройств // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. Т. 34. № 2. С. 110–114. ISSN 1813–9108.
5. Шаманов В. И., Пульяков А. В. Марковская модель процесса технического обслуживания и ремонта устройств автоматики // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. Т. 17. № 1. С. 82–85. ISSN 1813–9108.
6. Алешин В. Н. Микропроцессорная централизация стрелок и сигналов системы EBILock 950 // Автоматика, связь, информатика. 2003. № 1. С. 13–17. ISSN 0005–2329.
7. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : учебное пособие / В. В. Сапожников, Вл. В. Са-

Рис. 3. Пример карточки запроса

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменение структуры взаимодействия технического персонала, сервисных центров железной дороги и региональных сервисных центров компании ООО «Бомбардье Транспортейшн (Сигнал)» на основе разработанного авторами статьи веб-приложения поможет персоналу каждой станции, оборудованной устройствами МПЦ EBILock 950, получить доступ к необходимой информации о способах устранения отказов в этих устройствах.

Применение веб-технологий позволит обеспечить оперативность взаимодействия персонала линейных предприятий и специалистов сервисных центров, минимизировать затраты на устранение отказов, а следовательно, сократить ущерб, вызванный задержками поездов при длительном устранении отказов.

References

1. Microprocessor centralization systems [Mikroprotsessornye sistemy tsentralizatsii] / Ed. by Vl. V. Sapozhnikov. Moscow : UMTs ZhDT, 2006. 398 p.
2. Technical operation of devices and systems of railway automation and telemechanics [Tekhnicheskaya ekspluatatsiya ustroystv i sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki] : textbook / Vl. V. Sapozhnikov, L. I. Borisenko, A. A. Prokofyev, A. I. Kamenev ; ed. by Vl. V. Sapozhnikov. Moscow : Routec, 2003. 336 p.
3. Shamanov V. I., Pultyakov A. V. Improvement of maintenance system of automation devices [Sovershenstvovanie sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya ustroystv avtomatiki] // Automation, communication and informatics. 2008. No. 12. Pp. 13–15. ISSN 0005–2329.
4. Vолодарский В. А. The principle of selection technical devices of service strategy [Printsipy vybora strategij obsluzhivaniya tekhnicheskikh ustroystv] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2012. Vol. 34. No. 2. Pp. 110–114. ISSN 1813–9108.
5. Shamanov V. I., Pultyakov A. V. Markov model of the process of maintenance and repair of automation devices [Markovskaya model' protsesa tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta ustroystv avtomatiki] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2008. Vol. 17. No. 1. Pp. 82–85. ISSN 1813–9108.
6. Aleshin V. N. Microprocessor centralization of switches and signals of the EBILock-950 system [Mikroprotsessornaya tsentralizatsiya strelok i signalov sistemy EBILock-950] // Automation, communication and informatics. 2003. No. 1. Pp. 13–17. ISSN 0005–2329.
7. Reliability of railway automation, telemechanics and communication systems : textbook [Nadezhnost' system zheleznodorozhnoy avtomati-



- пожников, Д. В. Ефанов, В. И. Шаманов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. Москва : УМЦ ЖДТ, 2017. 318 с.
8. Володарский В. А. Исследование надежности постовых устройств МПЦ EBILock 950 // Автоматика на транспорте. 2017. Т. 3. № 4. С. 477–490. ISSN 2412–9186.
 9. Типовое положение о сервисных и фирменных центрах сопровождения и ремонта микропроцессорных устройств и систем ЖАТ / Д. В. Гавзов, Д. Е. Абрамов, А. И. Каменев, В. Д. Водяхин. Москва : МПС России, 2002. 17 с.
 10. Лекута Г. Ф. Техническое обслуживание МПЦ EBILock 950 // Автоматика, связь, информатика. 2004. № 8. С. 9–11. ISSN 0005–2329.
 11. Фурсов С. И. Принципы организации сервисного обслуживания МПЦ EBILock 950 // Автоматика, связь, информатика. 2010. № 1. С. 11–12. ISSN 0005–2329.
 12. Солдатенков Е. Г. Улучшать взаимодействие разработчиков МПУ и обслуживающего персонала // Автоматика, связь, информатика. 2010. № 1. С. 13–14. ISSN 0005–2329.
 13. Олинович Н. А., Лихота Р. В., Алексеенко В. А. Повышение качества взаимодействия сервисных центров со службами автоматики и телемеханики ДИ ОАО «РЖД» // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы шестой международной научно-практической конференции / ИрГУПС. Иркутск, 2015. Т. 2. С. 267–272.
 14. Пульяков А. В., Лихота Р. В., Алексеенко В. А. Взаимодействие специализированных сервисных центров с дистанциями СЦБ на основе комплекса задач «К3 МПУ» // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы седьмой международной научно-практической конференции / ИрГУПС. Иркутск, 2016. Т. 1. С. 258–263.
 15. Повышение качества эксплуатации микропроцессорных устройств / М. В. Белькович, А. В. Пульяков, Р. В. Лихота, В. А. Алексеенко // Автоматика, связь, информатика. 2016. № 1. С. 24–27. ISSN 0005–2329.
 16. Providing a synergistic effect in the quality improvement of the railway automation system, MPC EBILock 950, maintenance / R. V. Likhota, P. A. Lontsikh, E. Yu. Drolova et al. // 2017 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS), St. Petersburg, 2017. Pp. 75–78.
 - ki, telemekhaniki i svyazi] : textbook / V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov, V. I. Shamanov ; ed. by Vl. V. Sapozhnikov. Moscow : UMTs ZhDT, 2017. 318 p.
 8. Volodarskiy V. A. The study of EBILock 950 interlocking tower equipment reliability [Issledovanie nadezhnosti postovykh ustroystv MPTs EBILock 950] // Automation on Transport. 2017. Vol. 3. No. 4. Pp. 477–490. ISSN 2412–9186.
 9. Model provision on service and branded support and repair centers for microprocessor-based devices and systems of railway automation and telemechanics [Tipovoe polozhenie o servisnykh i firmennykh tsentrakh so-soprovozhdeniya i remonta mikroprotsessornykh ustroystv i sistem ZhAT] / D. V. Gavzov, D. E. Abramov, A. I. Kamenev, V. D. Vodyakhin. Moscow, 2002. 17 p.
 10. Lekuta G. F. Maintenance of the MPC EBILock-950 [Tekhnicheskoe obsluzhivanie MPTs Ebilock-950] // Automation, communication and informatics. 2004. No. 8. Pp. 9–11. ISSN 0005–2329.
 11. Fursov S. I. Principles of the organization of the maintenance of the MPC EBILock-950 [Printsipy organizatsii servisnogo obsluzhivaniya MPTs EBILock-950] // Automation, communication and informatics. 2010. No. 1. Pp. 11–12. ISSN 0005–2329.
 12. Soldatenkov E. G. Improving the interaction of MPD developers and maintenance personnel [Uluchshat' vzaimodeystvie razrabotchikov MPU i obsluzhivayushhego personala] // Automation, communication and informatics. 2010. No. 1. Pp. 13–14. ISSN 0005–2329.
 13. Olinovich N. A., Likhota R. V., Alekseenko V. A. Improving the quality of interaction between service centers and automation and telemechanics services of Infrastructure Directorate of JSC Russian Railways [Povyshenie kachestva vzaimodeystviya servisnykh tsentrov so sluzhbami avtomatiki i telemekhaniki DI OAO «RZhD»] // Transport Infrastructure of the Siberian Region : materials of the Sixth International Scientific and Practical Conference / ISTU. Irkutsk, 2015. Vol. 2. Pp. 267–272.
 14. Pulyakov A. V., Likhota R. V., Alekseenko V. A. Interaction of specialized service centers with the signaling, centralization and interlocking distances on the basis of a complex of tasks of CT MPC [Vzaimodeystvie spetsializirovannykh servisnykh tsentrov s distantsiyami STsB na osnove kompleksa zadach «KZ MPTs»] // Transport Infrastructure of the Siberian Region : materials of the Seventh International Scientific and Practical Conference / ISTU. Irkutsk, 2016. Vol. 1. Pp. 258–263.
 15. Improving the quality of operation of microprocessor devices [Povyshenie kachestva ekspluatatsii mikroprotsessornykh ustroystv] / M. V. Belkevich, A. B. Pulyakov, R. V. Likhota, V. A. Alekseenko // Automation, communication and informatics. 2016. No. 1. Pp. 24–27. ISSN 0005–2329.
 16. Providing a synergistic effect in the quality improvement of the railway automation system, MPC Ebilock 950, maintenance / R. V. Likhota, P. A. Lontsikh, E. Yu. Drolova et al. // 2017 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS), St. Petersburg, 2017. Pp. 75–78.

Объем статьи 0,64 авторских листа

УДК 629.4.014.62

Владимир Юрьевич Лиференко, инженер ЗАО Научная организация «Тверской институт вагоностроения» (ЗАО НО «ТИВ»), Тверь, Россия

ОБ ОТДЕЛЬНЫХ ПРИЧИНАХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВИБРАЦИИ В ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНАХ

Vladimir Yuryevich Liferenko, Engineer, CJSC Scientific organization «Tver Institute of Car Engineering», Tver, Russia

On separate reasons of vibration occurrence in passenger cars

Аннотация

Одна из наиболее важных экологических задач, стоящих перед вагоностроительной отраслью, — снижение вибрации в пассажирских вагонах. В настоящее время перед отправкой потребителю все выпускаемые и модернизированные модели вагонов проходят процедуру обязательной сертификации. При этом всесторонне исследуются их характеристики, в том числе вибравакустические, поскольку от величины этих показателей в значительной мере зависит здоровье пассажиров и обслуживающего персонала. Тем не менее, данные медицинского обследования проводников свидетельствуют о том, что число заболеваний, связанных с воздействием избыточных уровней вибрации, не уменьшается. В статье предложен вариант решения проблемы, позволяющий снизить уровни вибрации в пассажирских вагонах на частотах выше 16 Гц.

Ключевые слова: экология, пассажирский вагон, эксперимент, внешний шум, вибрация, спектр.

Summary

One of most important ecological tasks for carriage engineering is the abatement of vibrations in passenger cars. Nowadays before forwarding to the consumer all produced and modernized car models pass a mandatory certification procedure. During the procedure all characteristics of cars are thoroughly investigated including vibroacoustic characteristics because the values of these indicators significantly affect health of passengers and staff. Nevertheless, data from medical examination of guards show that the number of illnesses caused by the influence of excessive vibration levels doesn't decrease. The paper proposes a variant of the problem solution that allows decreasing levels of vibration in passenger cars at frequencies above 16 Hz.

Keywords: ecology, passenger car, experiment, external noise, vibration, spectrum.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-48-53

Холдинг «РЖД», основной поставщик услуг в пассажирском вагоностроении, в 2014 г. обозначил общее направление развития отрасли на период до 2030 г. [1]. В этой стратегии поставлена цель реализовать все потенциальные возможности отечественного вагоностроения.

Одним из направлений совершенствования вагонных конструкций является снижение повышенных уровней вибрации, воспринимаемой пассажирами и обслуживающим персоналом. Нормативы, на соответствие которым проводятся вибрационные испытания, приведены в [2] и основаны на требованиях о недопустимости возникновения заболеваний или отклонений в состоянии здоровья людей [3]. При испытаниях нередко фиксируются виброускорения, близкие или совпадающие по величине с допускаемыми. Однако уровни вибрации, соответствующие показателям комфорта, должны быть еще ниже. Следовательно, подтверждение требуемых характеристик при сертификационных испытаниях вагонов еще не гарантирует пассажирам комфортный проезд по железным дорогам. Кроме того, во-первых, испытания проводятся на железнодорожных участках и полигонах, имеющих высокую оценку качества, а вагоны часто эксплуатируются на путях с гораздо худшими показателями. Во-вторых, основные критерии методики проведения испытаний, приведенные в ГОСТ 33885–2016 [4], в значительной степени устарели и не способны в полной мере отразить реальную картину вибрационных процессов, происходящих в пассажирских вагонах.

В настоящее время, в связи с ускорением технического прогресса во всех отраслях машиностроения, запрос населения на качество получаемых услуг растет, поэтому исследования, направленные на сохранение и увеличение объема пассажирских перевозок железнодорожным транспортом, целесообразно интенсифицировать. Непрерывное повышение эффективности операционной деятельности при постоянном росте качества предоставляемых услуг за счет высокого уровня инноваций и обеспечения безопасности перевозок — цель, которая согласуется со стратегией развития холдинга «РЖД» [5]. Возможность реализации таких мероприятий обусловлена новейшими данными о процессах, приводящих к возникновению и распространению вибрации, а ресурс современного приборного обеспечения позволяет получать более детальную информацию в ходе проведения исследований и испытаний.

Тема борьбы с повышенными уровнями вибрации достаточно хорошо разработана. На протяжении всей истории вагоно-

строения инженерами-конструкторами постоянно ведутся работы по улучшению шумо- и виброметрических характеристик вагонов. Этому вопросу посвящены труды многих российских ученых [6–9]. Как в отечественной, так и в зарубежной литературе описаны результаты множества научных исследований, направленных на изучение причин возникновения вибрации в пассажирских вагонах и способов борьбы с ними. Благодаря этим работам вагоностроителям на протяжении многих лет удавалось качественно улучшать конструкции вагонов, однако в настоящее время предложенные меры во многом исчерпали себя и дальнейшего совершенствования виброакустических характеристик не происходит.

Последние санитарно-эпидемиологические исследования отечественных ученых свидетельствуют о том, что показатель заболеваемости проводников пассажирских вагонов, связанный с воздействием повышенных уровней шума и вибрации, не снижается. То есть, несмотря на проведение многочисленных мероприятий, обслуживающий персонал по-прежнему подвергается значительно му воздействию этих факторов. Как показывает многолетний анализ результатов комплексной санитарно-гигиенической оценки условий труда проводников пассажирских вагонов, в 2011 г. доля страдавших вибрационной болезнью составляла 28,8 %, в 2012-м — 30,8 %, в 2013-м — 22,1 %, в 2014-м — 28,3 % [10]. Отметим, что наряду с шумом и вибрацией, генерируемыми в различных системах жизнеобеспечения вагонов, основными источниками остаются процессы, возникающие в зоне контакта «колесо — рельс» при движении вагонов.

Кроме того, анализ состояния здоровья проводников может служить критерием для оценки уровня воздействия вибрации и на пассажиров. В общем объеме перевозки пассажиров железнодорожным транспортом традиционно и проч но занимают второе место (по данным на 2016 г. — 1040 млн чел.) после автобусных перевозок [11]. Если учесть дальность перевозок, то железная дорога (свыше 124 млрд пассажиро-километров) уступает воздушному транспорту менее чем в два раза [12]. В период с января

Таблица 1

Эквивалентные уровни виброускорений
на буксовом узле вагона модели 61-4458 при различных скоростях движения

Скорость, км/ч	40	60	80	100	120	140
Уровень СК3, м/с ²	2,0	2,3	2,8	3,4	3,4	4,5

по сентябрь 2018 г. услугами ОАО «РЖД» воспользовались 754,01 млн чел. Пассажирооборот при этом составил 101 млрд пассажиро-километров [13]. Если учесть, что средняя скорость самолета примерно 900 км/ч, а маршрутная скорость пассажирского состава — 60 км/ч, то время, проведенное пассажирами поездов в дороге, на порядок превышает показатели конкурентов.

В связи с приведенными выше аргументами в ЗАО НО «ТИВ» было принято решение об изменении направления деятельности. Вначале следовало определиться, с вибрацией какой природы целесообразнее вести борьбу. Как показали результаты многочисленных испытаний, проведенных специалистами института, в помещениях вагонов всех исследованных моделей преобладают частоты, имеющие корреляцию с частотой оборотов колеса [14]. На графиках зависимости виброускорений от частоты такая картина выглядела как пик в полосе, соответствующей скорости движения опытного поезда, значительно превышающей все остальные уровни.

После выделения из общей картины соответствующих доминирующих вибраций был проведен ряд стендовых и пробежных испытаний.

Для определения вибрации, передаваемой от колес к местам расположения пассажиров в вагоне через металлоконструкцию последнего, была разработана методика и проведен опыт с ударом в колесо. Суть его заключалась в имитации процесса взаимодействия колеса с рельсом при движении вагона по прямолинейным бесстыковым участкам железнодорожного пути. Для определения силы воздействия на колесо использовались результаты ранее проведенных на экспериментальном полигоне пробежных испытаний вагона модели 61-4458. В ходе этой работы фиксировались уровни виброускорений на буксовом узле при движении вагона с различными скоро

ми. Некоторые результаты исследований приведены в табл. 1.

При помощи молота через алюминиевую прокладку создавались ударные нагрузки на поверхность контакта колеса с рельсом. Диапазон возникавших при этом виброускорений по эквивалентному уровню совпадал с результатами пробежных испытаний. В процессе испытаний фиксировались уровни виброускорений на буксе, раме тележки, хребтовой балке в зоне тележки и в середине вагона в трех направлениях — вертикальном и горизонтальном, продольном, попечерном.

При испытаниях получены сходные картины для всех исследованных процессов. Для наглядности на рис. 1–3 показаны величины горизонтальной вибрации на колесе, раме тележки и хребтовой балке в середине вагона. По горизонтальной оси отложены временные интервалы между ударами.

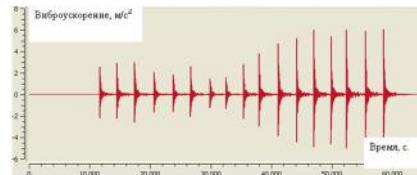


Рис. 1. Осциллограмма ускорений на колесе

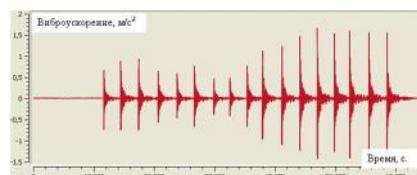


Рис. 2. Осциллограмма ускорений на раме тележки

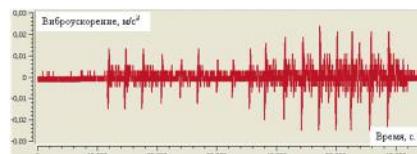


Рис. 3. Осциллограмма ускорений в середине вагона

По данным осциллографм видно, что уровни эквивалентных виброускорений на буксе и на хребтовой балке в середине вагона на два порядка отличаются друг от друга и значительно ниже уровней, фиксируемых во время проведения ходовых виброметрических испытаний. Таким образом, очевидно, что металлоконструкция вагона в незначительной степени передает вибрацию от места ее возникновения к зонам расположения пассажиров. Это свидетельствует о том, что вибрации, регистрируемые на местах размещения пассажиров в вагонах, имеют иную природу и на кузов передаются по другим каналам.

В связи с этим была выдвинута гипотеза о том, что генерирование вибрации кузова вагона происходит посредством передачи энергии шума, возникающего в зоне контакта «колесо — рельс», непосредственно на металлоконструкцию вагона через воздушное пространство. С первого взгляда такое предположение может показаться несостоятельным. Но с подтверждением возможности передачи вибрации от источника к приемнику посредством частиц воздуха мы сталкиваемся ежедневно. Ярким примером может служить слуховая система животных. Восприятие звуков происходит через раздражения рецептора слухового анализатора, в котором преобразуется механическая энергия звуковых волн. Один из основных элементов органа слуха — барабанная перепонка, приходящая в механическое колебательное движение при воздействии на нее вибрации частиц воздуха [15]. Несомненно, здесь мы имеем дело с другим порядком величин, но суть процесса возникновения вибрации в пластине (толщина значительно меньше остальных размеров), помещенной в звуковое поле, от этого не меняется. В рассматриваемом процессе роль барабанной перепонки выполняет элемент металлического настила пола, а акустическим раздражителем служит шум от контакта колеса с рельсом.

Для подтверждения этой идеи на втором этапе исследований были проведены пробежные испытания по определению уровней шума и его спектрального состава в подвагонном пространстве. Испытания проводились при положи-

тельной температуре окружающей среды на скоростном полигоне Белореченск при движении поезда со скоростями от 40 до 160 км/ч с интервалами 20 км/ч $\pm 5\%$. Измерительный микрофон устанавливался в двух местах — в зоне шкворневой балки и в среднем сечении кузова. Микрофон с предусилителем был надежно изолирован от возможного ударного воздействия элементов верхнего строения пути и прочих твердых веществ и турбулентных потоков воздуха, возникающих во время движения в непосредственной близости к кузову вагона. Для изготовления кожуха использовался супензионный беспрессовый самозатухающий пенополистирольный пенопласт ПСБ-С-25 плотностью 20 кг/м³. Измерительная аппаратура находилась непосредственно на испытуемом вагоне и соединялась с предусилителем штатным кабелем-удлинителем длиной 5 м. Способ установки микрофона в середине вагона показан на рис. 4.



Рис. 4. Расположение микрофона с предусилителем в защитном кожухе в подвагонном пространстве среднего сечения кузова

Чтобы исключить возможное снижение уровней звукового давления материалом кожуха, результаты незначительно корректировались при тарировании испытательной схемы в стационарных условиях.

Спектр, полученный при пробежных испытаниях, с помощью свободного аудиоредактора звуковых файлов Audacity был переведен в электронный вид. После преобразования производилась еще одна корректировка, необходимость которой обусловлена индивидуальными характеристиками акустической системы. Для этого акустический сигнал, измеренный на расстоянии 1 м, сравнивали с реальным спектром. Результатом стал сигнал, представленный на рис. 5, на котором для примера показана форма звукового спектра (с учетом корректировки), идентичного шуму, возникающему в подвагонном пространстве в зоне шкворневой балки при движении вагона со скоростью 160 км/ч по прямолинейному бесстыковому участку железнодорожного пути.

На следующем этапе для моделирования процесса воздействия акустической волны на элементы металлического настила пола вагона было сконструировано приспособление, представляющее собой плоский элемент, изготовленный из листа толщиной 2,0 мм, жестко закрепленный в стенде, имитирующем продольные и поперечные элементы жесткости рамы. Изображение стенда представлено на рис. 6.

Со стороны, противоположной источнику звука, через обратный тор, применяемый в конструкции вагона, создавалось

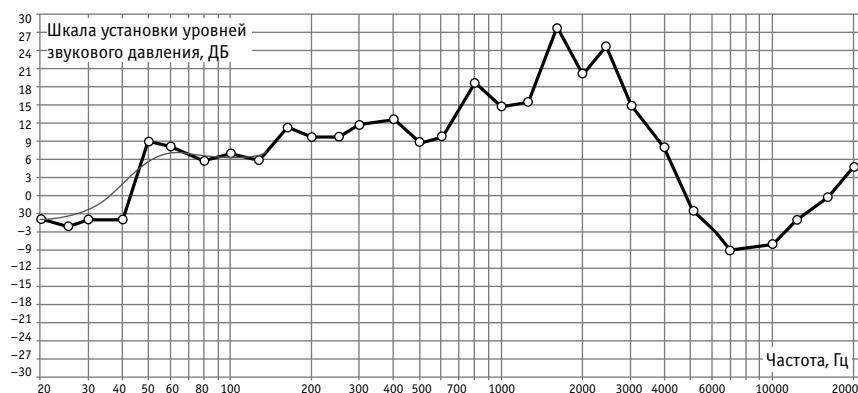


Рис. 5. Конфигурация генерируемого звукового сигнала, соответствующего скорости вагона 160 км/ч



Рис. 6. Стенд для имитации акустического воздействия на элемент металлического пола вагона

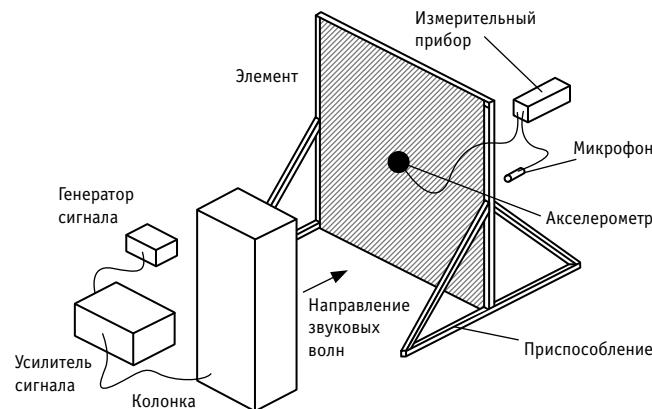


Рис. 7. Схема испытательного стенда

механическое усилие, имитирующее вертикальную нагрузку от веса внутреннего оборудования, вычисленное по данным расчета [16]. На листе и на раме стендса устанавливались трехкомпонентные акселерометры, фиксирующие вибрационные ускорения в третьоктавных полосах частот.

Суть эксперимента заключалась в определении уровней среднегеометрических виброускорений в элементе металлического настила пола вагона и элементах жесткости при фронтальном воздействии на него акустических сигналов, соответствующих скоростям движения вагона от 40 до 160 км/ч.

Контроль уровня звукового сигнала осуществлялся через микрофон, установленный в непосредственной близости к стенду и параллельно подключенный к аппаратуре, измеряющей вибрацию. Схема проведения испытаний, включающая в себя генератор и усилитель сигнала, акустическую систему (колонку), металлический лист, жесткую рамку, акселерометр, микрофон с предусилителем и измерительный прибор, представлена на рис. 7.

Как показали результаты испытаний, до достижения уровней звука, соответствующих скорости движения поезда 80 км/ч, существенных вибраций отмечено не было, что хорошо согласуется с данными многочисленных пробежных испытаний, проведенных ранее. Величины виброускорений в пластине при более интенсивном воздействии на них звуковой волны в направлении волнового фронта приведены в табл. 2. Отсутствие в таблице значений вибрации в ча-

Уровни виброускорений в третьоктавных полосах частот в пластине в поперечном направлении при воздействии акустической волны, $\text{м}/\text{с}^2$

Скорость, $\text{км}/\text{ч}$	Третьоктавные полосы частот, Гц								
	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100
100	0,06	0,05	0,08	0,10	0,11	0,18	0,09	0,10	0,10
120	0,09	0,10	0,11	0,14	0,20	0,19	0,12	0,20	0,16
140	0,10	0,11	0,15	0,17	0,18	0,22	0,15	0,17	0,16
160	0,18	0,11	0,13	0,18	0,17	0,20	0,21	0,14	0,18

Таблица 2

Уровни виброускорений в вертикальном направлении на полу

в середине вагона при проведении пробежных испытаний пассажирского некупейного вагона модели 61-4447, $\text{м}/\text{с}^2$

Скорость, $\text{км}/\text{ч}$	Третьоктавные полосы частот, Гц								
	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100
100	0,05	0,06	0,09	0,11	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05
120	0,07	0,09	0,12	0,15	0,11	0,07	0,07	0,07	0,07
140	0,09	0,07	0,13	0,13	0,14	0,07	0,07	0,08	0,09
160	0,21	0,06	0,09	0,13	0,09	0,05	0,06	0,07	0,10

стотных полос ниже полосы 16 Гц обусловлено возможностями акустической системы. Значения в полосах частот свыше 100 Гц не приведены ввиду того, что при пробежных испытаниях наблюдения в этом диапазоне не производились, поэтому отсутствует возможность их сравнения и интерпретации.

Ранее проведенные специалистами института испытания показали, что величины виброускорений на металлическом

полу, на хребтовой балке и на полу внутри вагона различаются незначительно — в пределах погрешности измерений. Соответственно сравнение этих данных с результатами пробежных испытаний будет корректным. Для примера в табл. 3 приведены результаты вибрационных испытаний пассажирского некупейного вагона модели 61-4447.

Как видно из анализа табл. 2 и 3, величины виброускорений имеют сходный

характер. Различия в результатах стационарных и пробежных испытаний могут быть объяснены разностью между идеальными условиями стеновых и реальными условиями пробежных испытаний. Причиной несколько меньших ускорений, зарегистрированных на реальной конструкции в частотных полосах выше 50 Гц, по-видимому, является значительное количество диссипативных связей.

Таким образом, в результате проведенных исследований: подтверждена возможность возникновения вибрации в элементах кузова при воздействии на них акустического шума;

установлено, что уровни вибрации, зафиксированные при пробежных испытаниях, имеют хорошую корреляцию с данными стеновых испытаний.

Уже на данном этапе исследований можно предложить способы снижения вибрации в пассажирских вагонах путем введения в их конструкции элементов, изолирующих кузов от воздействия акустической волны, генерируемой в зонах контакта колес с рельсами.

Продолжением работы должны стать испытания вариантов покрытия тонкостенных элементов кузова вагона различными звукоизолирующими или звукоглощающими материалами, позволяющими снизить виброускорения, которые возникают на кузове вагона и в его внутренних помещениях от воздействия звуковой волны. Особое внимание при этом необходимо обратить на металлический настил пола, подвергающийся воздействию максимальных уровней шума.

Литература

- Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года (основные положения). URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=6396 (дата обращения: 17.11.2019).
- Санитарные правила по организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте. Санитарно-эпидемиологические правила СП 2.5.1198-03 (с изменениями на 10 июня 2016 года). URL: <http://docs.cntd.ru/document/901854617> (дата обращения: 17.11.2019).
- Отечественный и зарубежный опыт гигиенического нормирования факторов производственной среды / ВНИИ охраны и экономики труда Минтруда России. Москва, 2014. 48 с.
- ГОСТ 33885–2016. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Методы испытаний по санитарно-гигиеническим и экологическим показателям. Москва : Стандартинформ, 2017. 49 с.
- Гапанович В. А. Три кита технического прогресса. URL: <http://www.pult.gudok.ru/archive/detail.php?ID=1315979> (дата обращения: 17.11.2019).
- Динамика вагона : учебник / Под ред. С. В. Вершинского. Москва : Транспорт, 1991. 860 с.
- Вагоны : учебник / Л. А. Шадур, И. И. Челноков, Л. Н. Никольский [и др.] ; под ред. Л. А. Шадура. Москва : Транспорт, 1980. 439 с.
- Вагоны : учебник / Под ред. Л. Д. Кузьмича. Москва : Машиностроение, 1978. 376 с.
- Динамика пассажирского вагона и пути модернизации тележки КВЗ-ЦНИИ / В. В. Хусидов, А. А. Хохлов, Г. И. Петров, В. Д. Хусидов ; под ред. А. А. Хохлова. Москва : МИИТ, 2001. 160 с.
- Юдаева О. С. Совершенствование системы обеспечения безопасных условий труда проводников пассажирских вагонов : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва : МИИТ, 2015. 48 с.
- Федеральная служба государственной статистики. Перевозки пассажиров по видам транспорта по Российской Федерации. URL: <https://www.gks.ru/folder/23455> (дата обращения: 17.11.2019).
- Федеральная служба государственной статистики. Пассажирооборот по видам транспорта по Российской Федерации. URL: <https://www.gks.ru/folder/23455> (дата обращения 17.11.2019).

References

- Strategy for the development of holding Russian Railways until 2030 (general provisions) [Strategiya razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2030 goda (osnovnye polozheniya)]. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=6396 (access date: 17.11.2019).
- Sanitary regulations on organization of passenger traffic on railway transport. Sanitary and Epidemiological regulations SP 2.5.1198-03 (with changes on the 10th of June 2016) [Sanitarnye pravila po organizatsii passazhirskikh perevozok na zheleznodorozhnom transporte. Sanitarno-epidemiologicheskie pravila SP 2.5.1198-03 (s izmeneniyami na 10 iyunya 2016 goda)]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901854617> (access date: 17.11.2019).
- Domestic and foreign experience of hygiene regulation of work environment factors [Otechestvennyi i zarubezhnyi opyt gigienicheskogo normirovaniya faktorov proizvodstvennoy sredy] / All-Russian Research Institute of Labour Protection and Economics of the Ministry of Labour of the Russian Federation. Moscow, 2014. 48 p.
- GOST 33885–2016. Passanger cars on locomotive traction. Test methods of sanitary-hygienic and ecological issues [Vagony passazhirskie lokomotivnoy tyagi. Metody ispytaniy po sanitarno-gigienicheskim i ekologicheskim pokazatelyam]. Moscow : Standardinform, 2017. 49 p.
- Gapanovich V. A. Three foundations of engineering progress [Tri kita tekhnicheskogo progressa]. URL: <http://www.pult.gudok.ru/archive/detail.php?ID=1315979> (access date: 17.11.2019).
- Dynamics of a car [Dinamika vagona] : textbook / Ed. by S. V. Vershinsky. Moscow : Transport, 1991. 860 p.
- Cars [Vagony] : textbook / L. A. Shadur, I. I. Chelnokov, L. N. Nikol'skiy et al. ; ed. by L. A. Shadur. Moscow : Transport, 1980. 439 p.
- Cars [Vagony] : textbook / Ed. by L. D. Kuz'mich. Moscow : Machinery, 1978. 376 p.
- Dynamics of a passenger car and ways of development of KVZ-TsNII bogie [Dinamika passazhirskogo vagona i puti modernizatsii telezhki KVZ-TsNII / V. V. Khusidov, A. A. Khokhlov, G. I. Petrov, V. D. Khusidov ; ed. by A. A. Khokhlov. Moscow : MIIT, 2001. 160 p.
- Yudaeva O. S. Development of system of safety conditions control for passenger car guards [Sovershenstvovanie sistemy obespecheniya bezopasnykh usloviy truda provodnikov passazhirskikh vagonov] : Synopsis of DSc in Engineering Thesis. Moscow : MIIT, 2015. 48 p.
- Federal State Statistics Service. Passenger transportations by type of transport in the Russian Federation [Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki. Perevozki passazhirovo po vidam transporta po Rossiiyskoy Federatsii]. URL: <https://www.gks.ru/folder/23455> (access date: 17.11.2019).
- Federal State Statistics Service. Passenger turn-over by type of transport in the Russian Federation [Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statisti-

13. ОАО «Российские железные дороги». URL: http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5232 (дата обращения: 17.11.2019).
14. Лиференко В. Ю., Юхневский А. А. О влиянии шума на уровень вибрации в помещениях пассажирских вагонов // Проблемы безопасности российского общества. 2017. № 3. С. 77–82. ISSN 2307–4396.
15. Алексеев С. П., Казаков А. М., Колотилов Н. Н. Борьба с шумом и вибрацией в машиностроении. Москва : Машиностроение. 1970. 208 с.
16. 4458.00.00.000.02РР. Вагон пассажирский с местами для сидения. Модель 61-4458. Определение координат центра тяжести кузова. Тверь : ОАО «ТВЗ», 2017. 33 с.
- ki. Passazhirooborot po vidam transporta po Rossiyskoy Federatsii]. URL: <https://www.gks.ru/folder/23455> (access date: 17.11.2019).
13. JSC Russian Railways [ОАО «Rossiyskie zheleznye dorogi»]. URL: http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5232 (access date: 17.11.2019).
14. Liferenko V. Yu., Yukhnevskiy A. A. On influence of noise on level of vibrations in salons of passenger cars [O vliyanii shuma na uroven' vibratsii v pomeshcheniyakh passazhirskikh vagonov] // Problems of safety of Russian society. 2017. No. 3. Pp. 77–82. ISSN 2307–4396.
15. Alekseev S. P., Kazakov A. M., Kolotilov N. N. Noise and vibration abatement in mechanical engineering [Bor'ba s shumom i vibratsiei v mashinostroenii]. Moscow : Machinery. 1970. 208 p.
16. 4458.00.00.000.02RR. Coach car. Model 61-4458. Determination of coordinates of car body centre of gravity [Vagon passazhirskiy s mestami dlya sideniya. Model' 61-4458. Opredelenie koordinat tsentra tyazhesti kuzova]. Tver : JSC «TVZ», 2017. 33 p.

Объем статьи 0,67 авторских листа

УДК 629.45

**Владислав Андреевич Ханис, аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»
Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия,**

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

**Андрей Леонидович Ханис, кандидат военных наук, доцент кафедры информационной безопасности
Юго-Западного государственного университета (ЮЗГУ), Курск, Россия,**

**Анна Андреевна Ханис, студентка кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»
Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия**

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРОВ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ПОЖАРООПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

**Vladislav Andreevich Khanis, postgraduate student, Railway Cars and Carriage Facilities Department,
Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russia,**

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

**Andrey Leonidovich Khanis, PhD in Military, Associate Professor, Information Security Department,
Southwest State University (SWSU), Kursk, Russia,**

**Anna Andreevna Khanis, student, Automation, Telemechanics and Communications on the Railway Department,
Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russia**

Method for assessing fire risk on the basis of monitoring of fire-hazardous conditions of passenger cars electric equipment

Аннотация

В статье обоснован подход к оценке вероятности возгорания электрооборудования в пассажирских вагонах подвижного состава. Представленный метод основан на мониторинге параметров, связанных с физическими процессами, ведущими к возгоранию, и позволяет исключить из рассмотрения влияние человеческого фактора как источника пожароопасности.

Ключевые слова: пожароопасное состояние, пассажирские вагоны, мониторинг пожароопасных состояний, риск возгорания, вероятность возгорания электрооборудования.

Summary

The paper substantiates an approach to assess a probability of electric equipment combustion in passenger cars. The method proposed is based on monitoring of parameters connected with physical processes that lead to combustion, and allows eliminating a human factor as a source of fire hazard from the consideration.

Keywords: fire-hazardous condition, passenger cars, monitoring of fire-hazardous conditions, fire risk, probability of electric equipment combustion.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-54-56

На подвижном составе железнодорожного пассажирского транспорта пожары представляют особую опасность, поскольку даже относительно небольшие из них могут распространяться на крупные объекты инфраструктуры, приводить к значительным сбоям в графике движения поездов, высокой вероятности гибели или причинения вреда здоровью людей.

Для снижения ущерба от пожаров предпринимаются различные меры. Так, на стадии конструирования и производства они предусматривают обеспечение требуемого номинального уровня пожаробезопасности при отсутствии конструктивных ошибок и производственного брака, а также обеспечение правильной эксплуатации объектов в пределах допустимых условий. На стадии эксплуатации это меры, направленные на предупреждение пожаров, основанные на использовании диагностики и мониторинга пожароопасных состояний (ПОС) объектов, мероприятия по ликвидации пожаров при их возникновении.

Согласно статистике основными причинами пожаров на подвижном составе железнодорожного пассажирского транспорта являются неосторожное обращение с огнем и электрооборудованием (30–50 % случаев), технические неисправности тепловозов и электровозов (30–40 %), неисправности и неправильная эксплуатация электрооборудования (10–15 %) [1, 2].



С точки зрения вероятности возникновения пожаров и наносимого ущерба особенностями пассажирских вагонов являются большая роль человеческого фактора и быстрое развитие пожаров после возгорания. К возникновению пожаров, связанных с электрооборудованием, в частности, могут приводить:

работа под нагрузкой силовой и осветительной сетей при наличии неисправного электрооборудования;

работка электрооборудования без присмотра и контроля;

самостоятельный и, как следствие, неквалифицированный ремонт электрооборудования;

включение электронагревательных и других приборов и устройств, не предусмотренных электрической схемой вагона;

хранение посторонних предметов в нишах с электроаппаратурой, размещение легковоспламеняющихся предметов и материалов вблизи приборов отопления, электросветильников и других приборов и устройств;

эксплуатация электрооборудования с замыканием и утечкой тока на корпус вагона.

Важнейшей составляющей обеспечения пожарной безопасности пассажирских вагонов являются системы автоматики, которые дают возможность обнаруживать и ликвидировать пожары на ранних стадиях независимо от первоначальной причины. Для предотвращения возгораний, связанных с электрооборудованием вагонов, также дополнительно используют мониторинг пожароопасных состояний, который позволяет заранее принимать предупредительные меры.

При разработке и оценке эффективности функционирования систем мониторинга и раннего обнаружения ПОС электрооборудования пассажирских вагонов необходимо создание соответствующих математических моделей по определению вероятности возникновения пожаров. Среди аналитических моделей наиболее распространены статистические, основанные на понятии частоты возникновения пожаров v , которая по физическому смыслу представляет собой вероятность события (возгорания) в единицу времени [3, 4]. При этом пожароопасный объект рассматривается как совокупность взаимодействующих элементов, для которых имеются априорные теоретические или экспериментальные оценки частоты возгорания, обусловленные выявленными факторами пожароопасности [4, 5]. В простейших случаях частота и вероятность возгорания объекта $P(t, \tau)$ на интервале времени от t до $t + \tau$ могут быть вычислены по формулам [3, 4]:

$$v = \sum_{n=1}^N v_n; \quad (1)$$

$$P(t, \tau) = 1 - e^{-v\tau}, \quad (2)$$

где v_n — частота возгораний n -го элемента, $n = 1, \dots, N$.

Выполним детализацию выражений (1) и (2) применительно к электрооборудованию вагонов с учетом типов пожароопасных элементов, динамики возможного изменения их состояний и внешних воздействий в предположении аддитивного влияния опасных факторов на вероятность возгорания.

Пусть q — порядковый номер типа элемента электрооборудования, $q = 1, \dots, Q$; k — порядковый номер элемента элек-

трооборудования в типе, $k = 1, \dots, K_q$. Частота возгорания k -го элемента q -го типа в момент времени t может рассматриваться как функция его текущего состояния $\vec{S}_{qk}(t)$. Состояние элемента представлено как упорядоченный набор (вектор) параметров, тип которого определяется типом элемента. Вид данного вектора у разнотипных элементов разный и пока не конкретизируется. Динамика состояний элемента $\vec{S}_{qk}(t)$ зависит от внешних условий и воздействий, которые аналогичным образом в общем виде можно описать некоторым вектором параметров $\vec{V}_{qk}(t)$. Таким образом, текущее состояние элемента можно рассматривать как $v_{qk}(t) = v_{qk}[\vec{S}_{qk}[t, \vec{V}_{qk}(t)]]$, а частоту возгорания как $v_{qk}(t) = v_{qk}[\vec{S}_{qk}[t, \vec{V}_{qk}(t)]]$. В выражении $\vec{S}_{qk}[t, \vec{V}_{qk}(t)]$ явная зависимость от времени t учитывает возможность изменения (эволюции) состояния элемента и вероятности возгорания, например, при фиксированных температуре и влажности окружающей среды.

На основе введенных обобщенных характеристик вероятность возгорания вагона $P(t, \tau)$, связанную с электрооборудованием, на интервале времени от t до $t + \tau$ следует вычислять по формулам, аналогичным (1) и (2):

$$v(t) = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^{K_q} v_{qk}[\vec{S}_{qk}[t, \vec{V}_{qk}(t)]]; \quad (3)$$

$$P(t, \tau) = 1 - e^{-\int_t^{t+\tau} v(t) dt}. \quad (4)$$

Техническую систему, оценивающую вероятность возгорания $P(t, \tau)$, можно рассматривать как основу системы мониторинга ПОС электрооборудования вагонов, в которой исходными данными являются текущие параметры внешних условий и воздействий $\vec{V}_{qk}(t)$. По зависимостям $P(t, \tau)$ могут быть построены классификатор состояний и система предупреждения о риске возгорания.

Наибольшие трудности при использовании выражений (3) и (4) обусловлены неопределенностью зависимостей $\vec{V}_{qk}(t)$, $\vec{S}_{qk}(t, \vec{V}_{qk})$ и $v_{qk}(\vec{S}_{qk})$. При отсутствии человеческого фактора, мало поддающегося моделированию и контролю, указанные зависимости в принципе можно было бы построить на основе теоретических моделей и экспериментальных данных о частоте возгорания элементов разного типа в различных условиях. Однако в случае электрооборудования пассажирских вагонов человеческий фактор является одним из главных, приводящим к возникновению пожаров. Поэтому представляется целесообразным в системе мониторинга ПОС значения v_{qk} находить по текущим параметрам, характеризующим физические процессы, которые могут вызывать возгорание элементов электрооборудования. Анализ литературных данных, проведенный в [5], показывает, что в качестве исходных базовых параметров могут быть взяты температура элемента в одной или нескольких точках $T(t)$, значение напряжения $U(t)$ и силы тока $I(t)$. В этом случае

$$v(t) = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^{K_q} v_{qk}[T_{qk}(t), U_{qk}(t), I_{qk}(t)]. \quad (5)$$



Важно отметить, что зависимости для напряжений $U_{qk}(t)$ и токов $I_{qk}(t)$ исходно рассматриваются как функции произвольного вида, описывающие, например, негармонические пульсации или хаотические импульсные процессы при наличии искрового разряда [6, 7].

Зависимости $v[T(t), U(t), I(t)]$ представляется возможным найти путем экспериментальных исследований для каждого из интересующих элементов электрооборудования ваго-

на. Соответствующая система мониторинга ПОС должна включать подсистему оценки пожароопасных состояний на основе анализа данных датчиков температуры, напряжения и тока в элементах электрооборудования, определения текущей частоты возгорания каждого элемента и вычисления общей вероятности возгорания вагона $P(t, \tau)$, связанной с текущим состоянием электрооборудования [8].

Литература

1. Отчет о статистике пожаров в ОАО «РЖД» / ОАО «РЖД». Москва, 2009.
2. Сметанина М. И. Состояние пожарной безопасности на железнодорожном транспорте в Российской Федерации // Научное сообщество студентов: Междисциплинарные исследования : сборник статей по материалам LII международной студенческой научно-практической конференции. 2018. № 17 (52).
3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Москва : Наука, 1969. 576 с.
4. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : приложение к Приказу МЧС России от 10.07.2009 г. № 404.
5. Фролов С. Н. Метод, модель и алгоритмы анализа и оценки рисков возникновения пожароопасных ситуаций в электросетях на основе многоагентного подхода : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Курск, 2014.
6. Метод и алгоритм анализа и прогнозирования пожаробезопасности при применении модульной структуры автоматизированной защиты помещений центров обработки данных / В. В. Серебровский, Н. А. Ханис, Е. В. Журавлева, А. Л. Ханис // Известия ЮЗГУ. 2015. № 2 (15). С. 47–54. ISSN 2223–1552.
7. Серебровский В. В., Ханис Н. А., Ханис А. Л. Метод анализа пожаробезопасности при применении модульной структуры автоматизированной защиты помещений центров обработки данных // Известия ЮЗГУ. 2015. № 1 (14). С. 8–14. ISSN 2223–1552.
8. Устройство диагностики и мониторинга состояния пожароопасности электрических сетей энергоснабжения объектов / А. А. Бурмака, С. Г. Емельянов, О. И. Атакищев [и др.] : патент 126876 Российская Федерация. № 2011147572/07; заявл. 24.11.11; опубл. 10.04.13, Бюл. № 10.

References

1. Statement on fire statistics in the JSC Russian Railways [Otchet o statistike pozharov v OAO «RZhD»] / JSC Russian Railways. Moscow, 2009.
2. Smetanina M. I. Condition of fire safety on railway transport in the Russian Federation [Sostoyanie pozharnoy bezopasnosti na zhelezodorozhnom transporte v Rossiyiskoy Federatsii] // Scientific community of students: Interdisciplinary research : proceedings of the LII international research and practice conference of students 2018. No. 17 (52).
3. Venttsel E. S. Probability theory [Teoriya veroyatnostey]. Moscow : Science, 1969. 576 p.
4. Method of determining calculated values of fire risk on industrial objects : annex to the Order of the EMERCOM of Russia dated 10.07.2009 No. 404 [Metod opredeleniya raschetnykh velichin pozharnogo riska na proizvodstvennykh ob'ektakh : prilozhenie k Prikazu MChS Rossii ot 10.07.2009 g. No. 404].
5. Frolov S. N. Method, model and algorithms of analysis and assessment of fire risks in electrical network on the basis of multi-agent approach [Metod, model' i algoritmy analiza i otsenki riskov vozniknoveniya pozharoopasnykh situatsiy v elektriosetyakh na osnove mnogoagentnogo podkhoda] : PhD in Engineering Thesis. Kursk, 2014.
6. Method and analysis algorithm and prediction of the fire safety in case of application of modular structure of automated protection of locations of data processing centers [Metod i algoritm analiza i prognozirovaniya pozharobezopasnosti pri primenenii modul'noy struktury avtomatizirovannoy zashchity pomeshcheniy tsentrov obrabotki dannykh] / V. V. Serebrovskiy, N. A. Khanis, E. V. Zhuravleva, A. L. Khanis // Journal Proceedings of the Southwest State University. 2015. No. 2 (15). Pp. 47–54. ISSN 2223–1552.
7. Serebrovskiy V. V., Khanis N. A., Khanis A. L. Method of the analysis of fire safety at application of modular structure, the automated protection of rooms of data-processing centers [Metod analiza pozharobezopasnosti pri primenenii modul'noy struktury avtomatizirovannoy zashchity pomeshcheniy tsentrov obrabotki dannykh] // Journal Proceedings of the Southwest State University. 2015. No. 1 (14). Pp. 8–14. ISSN 2223–1552.
8. Device for diagnostics and monitoring of fire-hazardous condition of power supply network [Ustroystvo diagnostiki i monitoringa sostoyaniya pozharoopasnosti elektricheskikh setey energosnabzheniya ob'ektov] / A. A. Burmaka, S. G. Emelyanov, O. I. Atakishhev et al.: patent 126876 Russian Federation. No. 2011147572/07; filed 24.11.11; publ. 10.04.13, Bulletin No. 10.

Объем статьи 0,34 авторских листа

УДК 656.08

**Евгений Сергеевич Воеводин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспорт»
Сибирского федерального университета (СФУ), Красноярск, Россия,**

**Кристина Вячеславовна Бакланова, аспирант кафедры «Транспорт»
Сибирского федерального университета (СФУ), Красноярск, Россия,**

**Николай Викторович Шадрин, старший преподаватель кафедры «Транспорт»
Сибирского федерального университета (СФУ), Красноярск, Россия,**

**Andrey Mikhaylovich Askhabov, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспорт»
Сибирского федерального университета (СФУ), Красноярск, Россия,**

**Andrey Sergeevich Polyakov, магистрант кафедры «Транспорт»
Сибирского федерального университета (СФУ), Красноярск, Россия**

АУДИТ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ФЕДЕРАЛЬНЫХ ТРУССАХ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

**Evgeniy Sergeevich Voevodin, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Department,
Siberian Federal University (SFU), Krasnoyarsk, Russia,**

**Kristina Vyacheslavovna Baklanova, postgraduate student, Transport Department,
Siberian Federal University (SFU), Krasnoyarsk, Russia,**

**Nikolay Viktorovich Shadrin, Senior Lecturer, Transport Department,
Siberian Federal University (SFU), Krasnoyarsk, Russia,**

**Andrey Mikhaylovich Askhabov, PhD in Engineering, Associate Professor,
Transport Department, Siberian Federal University (SFU), Krasnoyarsk, Russia,**

**Andrey Sergeevich Polyakov, graduate student, Transport Department,
Siberian Federal University (SFU), Krasnoyarsk, Russia**

Audit of road traffic safety on federal roads of Krasnoyarsk Territory

Аннотация

В статье рассматривается назначение и содержание аудита безопасности дорожного движения. В качестве примера на трассах федерального значения, проходящих по территории Красноярского края, определен приоритетный участок для проведения такого аудита. На основе детального анализа дорожных условий, влияющих на риск возникновения происшествий, и изучения механизмов ДТП на данном участке разработаны мероприятия по снижению уровня аварийности. Эффективность предложенных мероприятий проверена с помощью программы моделирования и реконструкции ДТП PC-Crash.

Ключевые слова: аварийность, безопасность, оценка, дороги, дорожно-транспортное происшествие, моделирование.

Summary

The paper considers an assignment and an essence of audit of road traffic safety. As an example, the authors have determined a priority section on federal roads of Krasnoyarsk Territory for conducting the audit. On the basis of detailed analysis of road conditions that affect the risk of accidents appearance and research of road traffic accidents mechanism on that section the authors have developed measures on decreasing accident rate. Efficiency of the proposed measures are verified with the use of PC-Crash program for modeling and reconstruction of road traffic accidents.

Keywords: accident rate, safety, assessment, roads, road traffic accident, modeling.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-57-62

До 1 декабря 2020 г. Правительство Российской Федерации должно разработать и утвердить третью государственную программу по обеспечению безопасности дорожного движения на период до 2030 г., направленную на снижение смертности и травматизма населения в результате дорожно-транспортных происшествий (ДТП) на автомобильных дорогах, а также на повышение эффективности системы управления в области обеспечения безопасности дорожного движения [1]. На данный момент завершается выполнение второй федеральной целевой программы повышения безопасности дорожного движения, в которой поставлена задача снизить количество ДТП к 2020 г. на 30 % по сравнению с 2010 г. [2]. Это подчеркивает необходимость введения дополнительных инструментов, способных минимизировать риски возникновения ДТП.

Мировые исследования показывают, что около 27 % аварий в системе «водитель — автомобиль — дорога — среда» происходят при взаимодействии элементов «водитель — дорога». Это область исследования нового для России инструмента — аудита безопасности дорожного движения.

Основные цели аудита безопасности дорожного движения направлены на снижение количества ДТП и тяжести их

последствий; повышение транспортно-эксплуатационных характеристик дорог; устранение мест концентрации ДТП; приведение элементов обустройства и технического содержания организации дорожного движения (ТСОДД) в соответствие с нормативными требованиями; разработку предложений по реализации мероприятий, способствующих устранению или смягчению влияния дорожных условий на риск совершения ДТП [3].

Область применения аудита безопасности — определение дефектов в восприятии дороги и окружающей среды водителем, которые могут привести к ошибочным действиям и возникновению ДТП. Аудит безопасности дорожного движения призван дополнить набор традиционных инструментов и методов их применения, расширяющих потенциал дорожной отрасли с целью определения и устранения рисков для участников дорожного движения. Внедрение аудита безопасности — это логический шаг к построению системы контроля рисков ДТП, охватывающей все факторы риска и все этапы жизненного цикла дорог [4, 5].

Как показывает исследование аварийности на федеральных дорогах Красноярского края (рис. 1) (проанализировано более 1000 карточек ДТП [6]), вина за ДТП полностью ложится на водителя, который сознательно или неосознанно нарушил правила или допустил ошибку во время управления автомобилем. Согласно статистике подобные аварии происходят даже на участках дорог, построенных в соответствии с нормами проектирования, строительства и эксплуатации. Это означает, что применение стандартов является разумным и фундаментальным условием, но не является абсолютным для безопасности дорожной сети и ее пользователей.

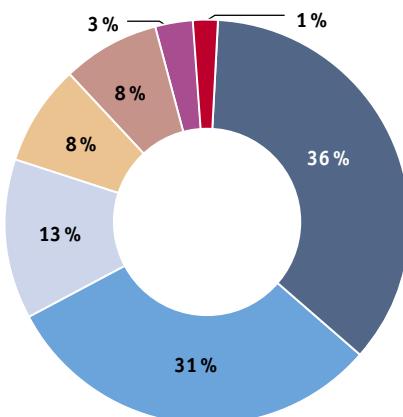


Рис. 1. Основные виды ДТП:

- 36 % — несоответствие скорости конкретным дорожным условиям;
- 31 % — выезд на полосу встречного движения;
- 13 % — нарушение правил расположения транспортных средств на проезжей части; 8 % — неправильный выбор дистанции;
- 8 % — несоблюдение очередности проезда; 3 % — нарушение требований дорожных знаков; 1 % — иные нарушения

По мере роста уровня автомобилизации увеличивается доля непрофессиональных водителей, не защищенных отраслевыми кодексами работы и отдыха и часто не информированных о потенциальных дорожных рисках [4], хотя исследования показывают, что до 28 % ДТП обусловлены дорожной

средой. Сама дорога способствует многим ДТП и (или) увеличивает тяжесть их последствий [6].

Для проверки безопасности движения на существующей или спроектированной дороге применяется аудит безопасности, исходя из которого группа независимых квалифицированных экспертов дает заключение о потенциальном риске аварий с целью их предотвращения.

Согласно ОДМ 218.6.027-2017, аудит безопасности дорожного движения — это проверка результатов деятельности организаций при проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных дорог на соответствие действующим требованиям нормативно-технических документов по организации и безопасности дорожного движения [3].

Область аудита безопасности включает в себя такие группы эксплуатационных характеристик дороги, как геометрические параметры, характеристики дорожного покрытия, обеспечение видимости, дорожная сигнализация, дорожные средства, управление движением, обеспечение безопасности в ходе дорожных работ.

Для проведения аудита на существующей эксплуатируемой дороге необходимы:

данные по интенсивности движения;

информация о ДТП;

отчеты о результатах прошлых аудитов безопасности, если такие проводились;

чертежи по факту строительства дороги [3].

Так как согласно исследованиям «РОСДОРНИИ» только за счет ликвидации места концентрации ДТП показатель аварийности можно снизить на 70 % [3], проведение аудита на федеральных дорогах Красноярского края весьма целесообразно.

Аудит существующей эксплуатируемой дороги экономически эффективно проводить лишь на аварийных участках. Причем среди них выбирается тот, на котором наблюдается максимальный социально-экономический ущерб от гибели/травматизма. Существует несколько методов расчета экономической оценки социальных потерь в результате ДТП: стоимость среднестатистической жизни, теория человеческого капитала, субъективная оценка стоимости жизни, подход МЧС к оценке стоимости экономического ущерба, подход PCA [5, 7, 8].

Величина социально-экономического ущерба от ДТП включает в себя ущербы, возникающие в результате следующих событий: гибели и ранения людей, повреждения транспортных средств, порчи груза, повреждения дороги.

В работах, выполненных ранее [6, 9], определен перечень аварийно-опасных участков на федеральных дорогах Красноярского края. Сводные данные по местам концентрации ДТП и примерный социально-экономический ущерб от гибели/травматизма за последние 4 года приведены в табл. 1.

Отметим, что в табл. 1 зафиксированы все места концентрации ДТП за 4 года, ежегодно приобретающие статус аварийно-опасных участков, и, как видно из приведенных данных, наибольший социально-экономический ущерб на 1 ДТП наблюдается на 808-м км федеральной дороги Р-255. На данном участке 10 из 13 ДТП — столкновения, в том числе 5 — во встречном направлении, 1 — в попутном направлении, 4 — поперечных. Причем 4 ДТП произошли в темное время суток.

Следовательно, в первую очередь именно на этом участке необходимо проанализировать годовую интенсивность движения (рис. 2) и разработать рекомендации по проведению мероприятий, предупреждающих ДТП.

Как видно из рис. 2, интенсивность движения транспортных средств на 808-м км трассы Р-255 непостоянна. Кроме того, среднемесячная суточная интенсивность самого напряженного месяца более чем в 2 раза превышает установленную на основе экономических изысканий или расчетами среднегодовую суточную интенсивность для дороги первой категории [6, 9].

Далее необходимо выявить места концентрации ДТП на аварийно-опасном километре дороги. В рамках аудита нами использован метод «скользящего окна», которое перемещается по всей протяженности дороги (рис. 3), — если в «окне» попадает участок с определенным количеством ДТП, то он квалифицируется как место концентрации ДТП. Метод «скользящего окна» можно применять, когда исследуемый участок находится в диапазоне до 1 км. Из рис. 3 видно, что на аварийно-опасном участке выявлено два места с повышенной концентрацией ДТП — 808 км 150 м и 808 км 50 м.

Перед разработкой мероприятий по ликвидации мест концентрации ДТП и повышению безопасности дорожного движения [10] необходимо определить перечень факторов, которые приводят к возникновению ДТП [11]. При аудите таких мест особое внимание уделяется факторам окружающей среды и дорожным факторам.

Согласно выполненным исследованиям, пик ДТП на 808-м км трассы Р-255 приходится на летний период года и светлое время суток, когда коэффициент сцепления шин с дорогой и обзорность наилучшие. Отсюда можно сделать вывод, что на этом участке влияние окружающей среды на концентрацию ДТП несущественно.

В результате анализа дорожных условий на рассматриваемом участке были зафиксированы следующие факторы опасности, которые повлекли неправильные действия (бездействие) водителей:

недостаточная ширина, сужение проезжей части, спуски, подъемы, кривые в плане малого радиуса;

Таблица 1

Сводные данные о местах концентрации ДТП
на федеральных дорогах Красноярского края за 2015–2018 гг.

Место концентрации ДТП	Число зарегистрированных ДТП	Число погибших, чел.	Число пострадавших, чел.	Социально-экономический ущерб от гибели и травматизма, млн руб.
P-255 770-й км	12	4	26	35,8 3,0
P-255 802-й км	12	3	15	24,6 2,1
P-255 808-й км	13	4	17	31,3 3,1
P-255 931-й км	13	0	22	11,0 0,8

Примечание. В числителе — общий ущерб, в знаменателе — в расчете на 1 ДТП.

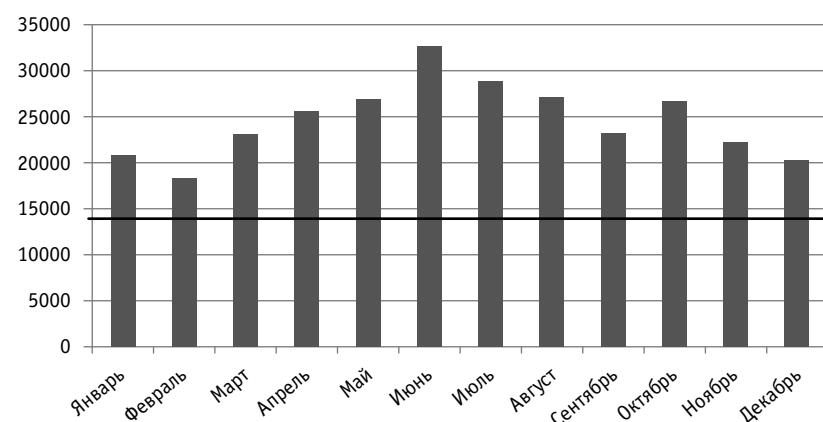


Рис. 2. Интенсивность движения транспортных средств на 808-м км трассы Р-255



Рис. 3. Применение метода «скользящего окна»
на аварийно-опасном участке 808-й км федеральной трассы Р-255

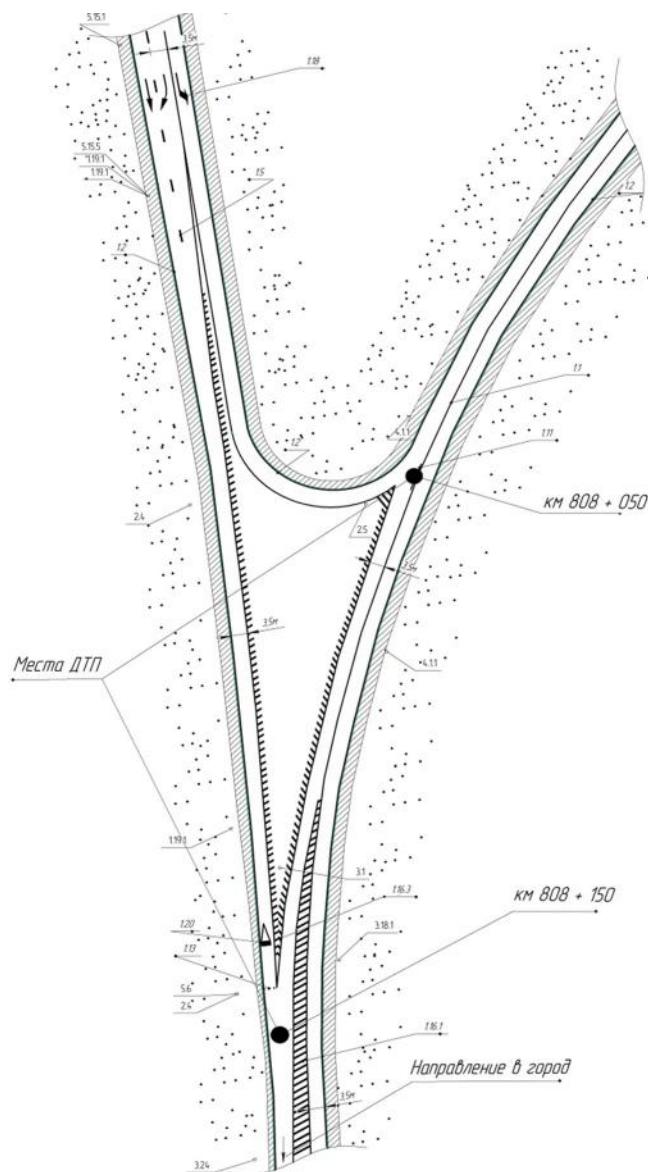


Рис. 4. Схема участка 808-й км федеральной трассы Р-255

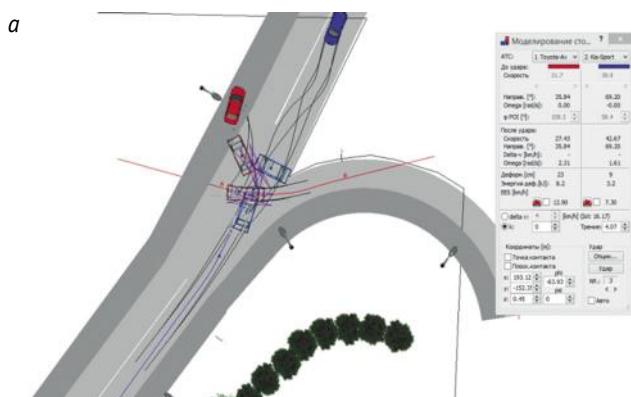


Рис. 5. Расположение транспортных средств после столкновения:

недостаточная ширина или неудовлетворительное состояние обочины;

дорожные факторы, приводящие к ослеплению водителя, ограничению обзорности и видимости;

недостаточность средств регулирования движения и информирования его участников.

Выбор работ по ремонту или реконструкции на 808-м км федеральной трассы Р-255 определяется необходимостью устранения всех основных дорожных факторов, провоцирующих ДТП. Поскольку реконструкция проезжей части и обустройство ТСОДД связаны со значительными финансовыми затратами, мероприятия по ликвидации мест концентрации ДТП должны быть научно обоснованы. Согласно методике проведения аудита безопасности дорожного движения, выбор таких мероприятий осуществляется в два этапа [10].

На первом этапе анализируется схема рассматриваемого участка (рис. 4).

Как показывает анализ, для места концентрации ДТП 808 км 50 м характерна высокая интенсивность левоповоротного движения. Так как скорости на федеральных трассах выше, чем в городе, ошибка водителя при выборе безопасного интервала для совершения маневра левого поворота может привести к серьезным последствиям.

В месте слияния автомобилей попутного направления (808 км 150 м) происходит сужение проезжей части. Кроме того, обочина находится в неудовлетворительном состоянии, ее ширина в месте концентрации ДТП (по направлению в город) менее 50 см, усугубляет ситуацию и то, что второстепенная дорога на этом участке — подъем в гору под углом 3,5°.

Таким образом, имея данные об общей структуре ДТП, влиянии дорожных факторов, интенсивности движения на изучаемом участке, мы переходим ко второму этапу выбора мероприятий по ликвидации мест концентрации ДТП.

На втором этапе нами проанализированы механизмы ДТП с помощью программы моделирования и реконструкции дорожно-транспортных происшествий PC-Crash. При моделировании использованы данные реальных ДТП, произошедших на рассматриваемом участке трассы Р-255 (рис. 5).

Для усовершенствования схемы ОДД на пересечении в месте концентрации ДТП 808 км 50 м необходимо устраниить кон-

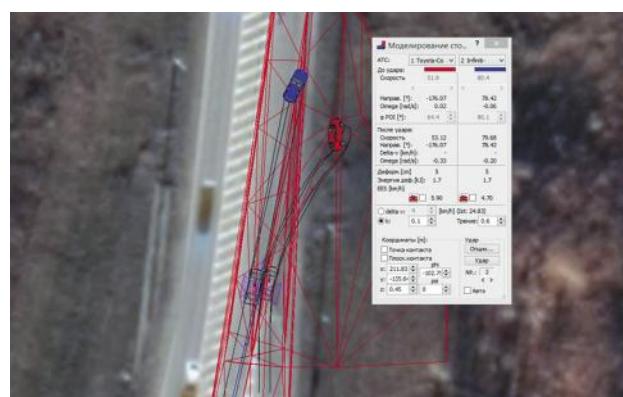


Рис. 5. Расположение транспортных средств после столкновения:

фликтную точку. При анализе схемы движения на транспортной развязке участка 808-й км федеральной трассы Р-255 выявлено, что оптимальным проектным решением по ликвидации конфликтной точки и минимизации перепробегов будет разделение транспортных потоков в пространстве, т.е. строительство левоповоротного соединительного ответвления (ЛПО) в месте, указанном на рис. 6, и установка информационного щита перед развязкой дорог с навигацией о направлениях движения на данном узле.

На участке 808 км 150 м для повышения безопасности дорожного движения необходимо уширить место слияния транспортных потоков до двух полос. Чтобы обеспечить место для маневра ухода при экстренных ситуациях, следует довести ширину обочины до нормативного значения, а также установить металлическое ограждение барьера типа.

При оценке эффективности предложенных мероприятий для участка концентрации ДТП 808 км 150 м была повторно создана в программе PC-Crash модель проезжей части с уширением дороги до двух полос (рис. 7).

Как видно из рис. 7, разработанные мероприятия дают возможность ликвидировать конфликтную точку и обеспечить безопасный боковой интервал движения.

Таким образом, использование методики аудита безопасности позволило выполнить анализ ДТП, выявить аварийно-опасные участки федеральной трассы Р-255, методом «скользящего окна» определить места концентрации ДТП на наиболее аварийно-опасном из них, проанализировать факторы дорожных условий, схему участка, смоделировать в программе PC-Crash реальные дорожно-транспортные происшествия и в результате разработать оптимальные мероприятия по ликвидации мест концентрации ДТП и повышению безопасности дорожного движения.

Аудит безопасности востребован прежде всего как современная система контроля качества (безопасности) дорог и услуг по их содержанию и эксплуатации. Выполняемый на всех этапах строительства дороги, от планирования до эксплуатации, аудит безопасности позволяет определять и устранять ошибки уже на этапе разработки документации и, таким образом, превентивно влиять на факторы, приводящие к возникновению ДТП.

Литература

- Перечень поручений по итогам заседания Государственного совета от 26.06.2019 г. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/61040> (дата обращения: 20.12.2019).
- О федеральной целевой программе «Повышение безопасности дорожного движения в 2013–2020 годах» : постановление Правительства Российской Федерации от 03.10.2013 г. № 864. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/61040> (дата обращения: 20.12.2019).
- ОДМ 218.6.027-2017 Рекомендации по проведению аудита безопасности дорожного движения при проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных дорог. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456090610> (дата обращения: 20.12.2019).
- Road Safety Audit / Yu. Huvarinen, E. Svatkova, E. Oleshchenko, S. Pushchina // Transportation Research Procedia. 20 (2017). Pp. 236–241.



Рис. 6. Схема направлений движения на транспортной развязке участка 808-й км федеральной трассы Р-255



Рис. 7. 3D-схема расположения транспортных средств относительно друг друга после реконструкции проезжей части

References

- List of assignments following the results of the Council of State session dated 26.06.2019 [Perechen' porucheniy po itogam zasedaniya Gosudarstvennogo soveta ot 26.06.2019 g.]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/61040> (access date: 20.12.2019).
- On the federal target-oriented program «Increase of road traffic safety in 2013–2020» [0 federal'noy tselevoy programme «Povyshenie bezopasnosti dorozhного dvizheniya v 2013–2020 godakh»] : Order of the Government of the Russian Federation dated 03.10.2013 No. 864. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/61040> (access date: 20.12.2019).
- IRG (Industry-specific road guidance document) 218.6.027–2017 Recommendations on conducting audit of road traffic safety at designing, constructing and operation of motor roads [ODM 218.6.027–2017 Rekomendatsii po provedeniyu audita bezopasnosti dorozhного dvizheniya pri proektirovani, stroytel'stve i ekspluatatsii avtomobil'nykh dorog]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456090610> (access date: 20.12.2019).
- Road Safety Audit / Yu. Huvarinen, E. Svatkova, E. Oleshchenko, S. Pushchina // Transportation Research Procedia. 20 (2017). Pp. 236–241.



5. Методика расчета стоимости человеческой жизни / Институт экономики транспорта и транспортной политики НИУ ВШЭ // Инновации в дорожном строительстве : II Международный форум, Сочи, 25–27 мая 2016 г. 14 с.
6. Пульянова К.В., Воеводин Е. С. Анализ статистики ДТП на федеральных дорогах Красноярского края // Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции «Борисовские чтения». Красноярск, 2017. С. 97–100.
7. Зубец А.Н., Новиков А. В. Численная оценка стоимости жизни человека в России и в мире // Финансы: теория и практика. 2018. Т. 22. № 4. С. 52–75. ISSN 2587–5671.
8. «Стоимость» человеческой жизни в России с учетом морального ущерба / Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации. URL: http://www.fa.ru/org/div/cos/press/Documents/58_Life_Value_2018.pdf (дата обращения: 20.12.2019).
9. Исследование интенсивности транспортного потока на Р255 и Р257 на территории Красноярского края / К. В. Пульянова, Е. С. Воеводин, А. М. Асхабов, А. С. Кашура // Сборник статей XII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2018. С. 71–73.
10. Методические рекомендации по назначению мероприятий для повышения безопасности движения на участках концентрации дорожно-транспортных происшествий. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200029300> (дата обращения: 20.12.2019).
11. Эльвик Р., Мюсен А. Б., Ваа Т. Справочник по безопасности дорожного движения / Пер. с норв. ; под ред. проф. В. В. Сильянова. Москва : МАДИ (ГТУ), 2001. 754 с.
5. Method of calculating human life price [Metodika rascheta stoimosti chelovecheskoy zhizni] / Institute for Transport Economics and Transport Policy Studies // Innovations in road construction : II International forum, Sochi, May 25–27, 2016, 14 p.
6. Pulyanova K. V., Voevodin E. S. Analysis of road traffic accidents statistics on federal roads of Krasnoyarsk Territory [Analiz statistiki DTP na federal'nykh dorogakh Krasnoyarskogo kraya] // Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference «Readings from Borisov». Krasnoyarsk, 2017. Pp. 97–100.
7. Zubets A. N., Novikov A. V. Quantitative assessment of the value of human life in Russia and in the world [Chislennaya otsenka stoimosti zhizni cheloveka v Rossii i v mire] // Finance: Theory and Practice. 2018. Vol. 22. No. 4. Pp. 52–75. ISSN 2587–5671.
8. «Price» of human life in Russia considering moral damage [«Stoimost» chelovecheskoy zhizni v Rossii s uchetom moral'nogo ushherba] / Financial University under the Government of the Russian Federation. URL: http://www.fa.ru/org/div/cos/press/Documents/58_Life_Value_2018.pdf (access date: 20.12.2019).
9. Investigation of road traffic rate on R 255 and R 257 roads in Krasnoyarsk Territory [Issledovanie intensivnosti transportnogo potoka na R255 i R257 na territorii Krasnoyarskogo kraya] / K. V. Pulyanova, E. S. Voevodin, A. M. Askhabov, A. S. Kashura // Collection of the XII International research and practice conference. Penza, 2018. Pp. 71–73.
10. Guidelines on measures assignment aimed to increase road traffic safety on sections with concentration of road traffic accidents [Metodicheskie rekomendatsii po naznacheniyu meropriyatii dlya povysheniya bezopasnosti dvizheniya na uchastkakh kontsentratsii dorozhno-transportnykh proisshestviy]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200029300> (access date: 20.12.2019).
11. Elvik R., Mysen A. B., Vaa T. Reference book on road traffic safety [Sправочник по безопасности дорожного движения] / Translation from Norwegian ; ed. by Professor V. V. Silyanov. Moscow : MADI, 2001. 754 p.

Объем статьи 0,7 авторских листа

УДК 62-408.8

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

Игорь Александрович Иванов, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология металлов» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,

Дмитрий Павлович Кононов, доктор технических наук, доцент кафедры «Технология металлов» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,

Сергей Викторович Урушев, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология металлов» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ НАЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Alexander Petrovich Buynosov, DSc in Engineering, Professor, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Igor Alexandrovich Ivanov, DSc in Engineering, Professor, Metal Technology Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

Dmitriy Pavlovich Kononov, DSc in Engineering, Associate Professor, Metal Technology Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

Sergey Viktorovich Urushev, DSc in Engineering, Professor, Metal Technology Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia

Some aspects of assigning parameters of machine parts surface structure

Аннотация

Рассмотрена международная практика назначения требований профильной оценки геометрической структуры поверхности в технической документации на детали машин. Выполнен анализ литературных данных, стандартов ISO 4288:1996, ISO 1302:2002 и введенного в январе 2016 г. ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Проведено сравнение параметров геометрической структуры поверхности по ГОСТ 2789-73 и ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Показаны особенности обозначения геометрической структуры поверхности деталей машин по ISO 1302:2002 и примеры назначения установленных требований. Приведенные примеры дадут возможность использовать ISO 1302:2002 для назначения параметров геометрической структуры поверхности в соответствии с ГОСТ Р ИСО 4287-2014.

Ключевые слова: машина, деталь, шероховатость поверхности, волнистость, первичный профиль, документация, обозначение, требования.

Summary

The paper considers international experience of assigning requirements of profile assessment of geometrical surface structure to machine parts in technical documentation. The authors have carried out analysis of literature, standards ISO 4288:1996, ISO 1302:2002 and GOST R ISO 4287-2014 that was introduced in January 2016. They have also conducted a comparison of parameters of geometrical surface structure according to GOST 2789-73 and GOST R ISO 4287-2014. The paper shows the peculiarities of designating geometrical structure of machine parts surface according to ISO 1302:2002 and examples of assigning the established requirements. These examples will allow using ISO 1302:2002 for assigning parameters of geometrical surface structure according to GOST R ISO 4287-2014.

Keywords: machine, part, surface roughness, undulation, primary profile, documentation, designation, requirements.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-63-69

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающие требования к изделиям в области машиностроения обеспечиваются разработкой комплексов стандартов Международной организации по стандартизации (ИСО) в соответствии с заданными геометрическими характеристиками деталей (GPS). Важное место среди них занимают стандарты о структуре поверхности, которой определяются износостойкость, герметичность соединений, коррозионная стойкость, усталостная прочность и другие качественные показатели. На основе применяемых в Российской Федерации и нормируемых требованиями ГОСТ 2789-73 характеристик структуры поверхности (R_a , R_z , R_{max} , S , Sm и tp) невозможно оценить все особенности микрогеометрии детали. Использование параметров профильной (ГОСТ Р ИСО 4287-2014) и трехмерной (ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014) оценки структуры поверхности представляет собой основной инструмент для повышения качества производимых (обрабатываемых) деталей и, как следствие, роста конкурентоспособности изделий.

В процессе обзора литературных и нормативных материалов [1–15] можно сформулировать некоторые особенности профильного метода и подготовить перечень рекомендаций по назначению параметров структуры поверхности детали. В результате пересечения реальной поверхности детали с плоскостью, направленной перпендикулярно этой поверхности, образуется профиль поверхности (рис. 1).

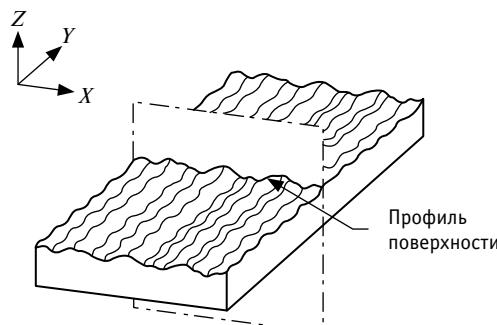


Рис. 1. Профиль поверхности детали

Параметры структуры поверхности детали [1, 4–5, 9–10] рассматриваются в прямоугольной системе координат. Оси образуют правосторонние декартовы координаты, ось X коллинеарна к средней поверхности, тогда как ось Z направлена наружу (от материала детали к окружающей среде).

Измеренный профиль поверхности — это профиль, получаемый после исследования его поверхности датчиком профилометра, разработанного в УрГУПС [16, 17] (рис. 2).

Для измерения профиля шероховатости, профиля волнистости и первичного профиля применяют три типа фильтров (рис. 3):

λ_s — расчленяющий шероховатость и более короткие длины волн поверхности;

λ_c — дифференцирующий некоторые неровности, имеющие отношение к шероховатости, и волнистость поверхности;

λ_f — отделяющий неровности, относящиеся к волнистости, от более длинных волн поверхности (формы).

При этом различают следующие виды профиля.

1. Первичный профиль (*primary profile*) служит базой для оценки параметров исходного профиля. Он определяется как профиль, полученный из измеренного после применения коротковолнового фильтра профиля λ_s (см. рис. 3 и 4). Размеры щупа, перемещающегося по поверхности, удаляют очень короткие волны, и на практике этот эффект механического фильтрования часто используется при отсутствии фильтра λ_s (например, при радиусе острия иглы датчика профилометра $r = 2 \text{ мкм}$).

2. Профиль шероховатости (*roughness profile*), получаемый при помощи фильтра λ_c из первичного профиля путем подавления длинноволнового компонента (см. рис. 3 и 4).

3. Профиль волнистости (*waviness profile*), получаемый путем последовательного применения фильтра профиля λ_f и фильтра профиля λ_c к первичному профилю при подавлении длинноволнового компонента фильтром профиля λ_f и коротковолновым компонентом фильтром профиля λ_c .

В большинстве стран Европы параметры шероховатости поверхности детали нормируются стандартами Международной организации по стандартизации (ISO) и разработанными на их базе региональными (EN) и национальными стандартами (ГОСТ Р, DIN, ASME). В последнее время в России также введена часть стандартов ISO, регламентирующих геометрические параметры структуры не только шероховатости поверхности, но и волнистости и первичного профиля: ГОСТ Р ИСО 4287-2014 [1], ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 и др.

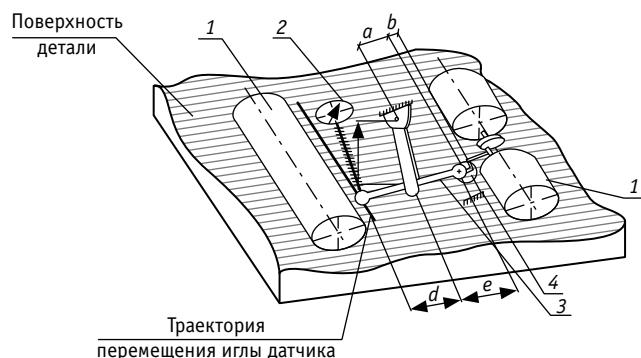


Рис. 2. Кинематическая схема работы профилометра:

$a = 2 \cdot b$; $d = c = e = 2,5 \cdot b$; 1 — направляющий ролик; 2 — индикаторная головка; 3 — шарнирный механизм Чебышева; 4 — механизм угловой передачи

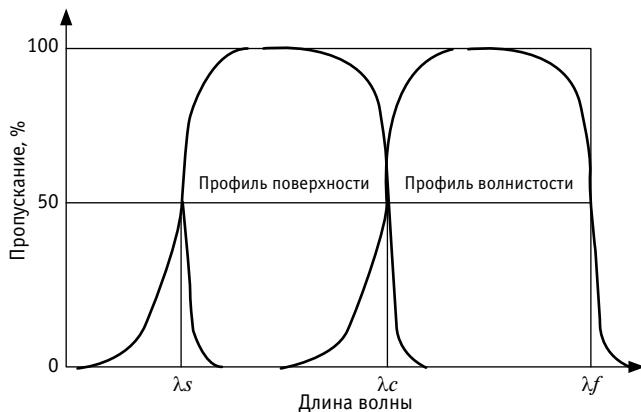


Рис. 3. Разделение структуры поверхности на профиль шероховатости и профиль волнистости

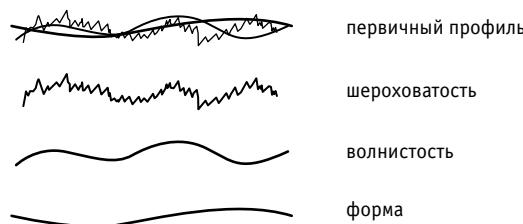


Рис. 4. Профили поверхности после фильтрации

В действующем ГОСТе 2.309-73 «ЕСКД. Обозначения шероховатости поверхностей» [3] отмечено, что он полностью соответствует стандарту ИСО 1302. Но в издании ISO 1302:2002 [12] имеются некоторые отличия в обозначениях, связанные с допускаемыми отклонениями величин параметров, длинами оценки и др.

1. СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ

СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ

ПО ГОСТ Р ИСО 4287-2014 И ГОСТ 2789-73

В табл. 1 приведены параметры структуры поверхности, нормируемые ГОСТ Р ИСО 4287-2014 и ГОСТ 2789-73 [1, 2, 4–5, 7, 10].

Таблица 1

Параметры структуры поверхности (шероховатости)*

Параметры по ГОСТ Р ИСО 4287–2014	Определяются в пределах длины		ГОСТ 2789-73 <i>lr</i>
	базовой <i>lr</i>	оценки <i>In</i>	
1. Амплитудные параметры			
<i>Rp</i> — максимальный размер пика профиля поверхности детали. Его значение может меняться от одной детали к другой. Параметр можно применять для оценки отдельных неровностей на шероховатой поверхности детали	+	-	-
<i>Rv</i> — максимальная глубина впадины профиля поверхности детали на базовой длине. Этот параметр также можно отнести к экстремальным, он имеет те же недостатки и достоинства, что и максимальный размер пика профиля. Используется на производственных участках, так как глубокие впадины часто служат концентриаторами напряжений, и их необходимо учитывать	+	-	-
<i>Rz</i> — высота (максимальная) профиля поверхности шероховатой детали. Это сумма наибольших глубины впадины и высоты выступа профиля поверхности в пределах базовой длины детали. В ГОСТ 2789–73 <i>Rz</i> используется для обозначения высоты неровностей по десяти точкам	+	-	-
<i>Rc</i> — средняя высота элементов профиля поверхности детали. Это среднее значение высоты элементов профиля шероховатой поверхности в пределах базовой длины детали. Параметр требует оптимизации по высоте и шагу. Если они не нормированы, то ограничение по высоте должно быть 10 % от <i>Rz</i> , ограничение по шагу — 1 % от базовой длины детали	+	-	-
<i>Rt</i> — общая высота профиля поверхности. Это сумма наибольшей высоты шероховатости и наибольшей глубины впадины профиля в пределах длины оценки детали	-	+	(<i>In</i>) <i>Rmax</i>
<i>Ra</i> — среднее арифметическое отклонение оцениваемого профиля поверхности детали. При помощи <i>Ra</i> оценивают среднюю амплитуду профиля поверхности шероховатой детали. Этот параметр является самым распространенным, однако не содержит никакой информации о форме неровностей профиля, поэтому его следует использовать с параметрами, дающими информацию о функциональности поверхности	+	-	<i>Ra</i>
<i>Rq</i> — среднеквадратическое отклонение (оценка). Среднее значение измеренных отклонений от средней линии (среднего значения), взятых на базовой длине детали. Является параметром, альтернативным <i>Ra</i> , и применяется для оценки поверхностей, полученных полированием и доводкой	+	-	-
<i>Rsk</i> — асимметрия оцениваемого профиля, характеризующая форму функции распределения высоты. Этот параметр подвержен значительному влиянию отдельных выступов или отдельных впадин поверхности детали. Его не рекомендуется применять при нормировании без указания других параметров	+	-	-
<i>Rku</i> — эксцесс (островершинность) оцениваемого профиля поверхности детали. Этот параметр учитывает форму функции распределения амплитуды и, так же как и <i>Rsk</i> , реагирует на выступы и впадины. Является измерителем остроты кривой плотности распределения. Используется в качестве исследовательского параметра	+	-	-
2. Шаговые параметры			
<i>RSm</i> — средняя ширина элементов профиля шероховатости поверхности детали. Требует высотной и шаговой дискриминации. Если они не оговариваются отдельно, то высотное ограничение элемента профиля должно быть 10 % от <i>Rz</i> , а шаговое составлять 1 % от базовой длины детали	+	-	<i>Sm</i>
3. Гибридные параметры			
<i>RΔq</i> — среднеквадратический угол наклона оцениваемого профиля поверхности детали, зависит и от амплитуды, и от шага, поэтому называется гибридным. Характеризует адгезионные свойства поверхности, что важно при покраске и нанесении различных покрытий. Кроме того, он характеризует концентрацию напряжений и устойчивость к износу. Чем меньше значение <i>RΔq</i> , тем больше отражательная способность поверхности	+	-	-
<i>Rmr(c)</i> — коэффициент смятия профиля. Это отношение опорной длины элементов профиля <i>Ml(c)</i> на заданном уровне сечения к длине оценки <i>In</i> . <i>Ml(c)</i> — сумма отрезков профиля, полученных пересечением профиля линией, параллельной средней линии, на уровне <i>c</i> . Параметр <i>Rmr(c)</i> определяется процентом относительной опорной длины на определенном уровне сечения профиля	-	+	<i>tp</i>
<i>Rdc</i> — различие высоты профиля среза. Это вертикальное расстояние между двумя уровнями срезов для данного коэффициента смятия	-	+	-
<i>Rmr</i> — относительный коэффициент смятия, определяемый при уровне среза профиля <i>Rdc</i> относительно заданного эталонного значения уровня сечения кривой относительной опорной поверхности	-	+	-

* В таблице приведены только параметры профиля шероховатости. Параметры первичного профиля и профиля волнистости обозначаются аналогично: *Pq* — для первичного профиля, *Wq* — для профиля волнистости, *Rq* — для профиля шероховатости и т.д.

2. ОБОЗНАЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ В ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Графический символ обозначения шероховатости поверхности (ГОСТ 2.309-73) используется в ISO 1302:2002 для обозначения требований к параметрам структуры поверхности не только шероховатости, но также волнистости и первичного профиля [4, 5, 11–15].

Оценка параметров шероховатости (ГОСТ 2789-73) производится (за исключением R_{\max}) с использованием только базовой длины. Как указано в табл. 1, параметры шероховатости (ГОСТ Р ИСО 4287-2014) оцениваются или на базовой длине l_r (например, R_p), или в пределах длины оценки l_n (например, R_t), принимаемой, как правило, равной пяти базовым длинам ($l_n = 5l_r$) по умолчанию [11]. При необходимости длина оценки может быть указана после параметра (например, $R_{8\max} 3,3$). Необходимость обеспечения максимального или минимального значения параметра указывается перед его числовым значением (max, min). Для остальных случаев по умолчанию используется «16 %-е правило» [11]. Требования к поверхности считаются приемлемыми, если не более 16 % всех измеренных значений превышают верхнее значение параметра, указанное на чертеже. То же при назначении нижней границы: не более 16 % измеренных значений должно быть меньше указанного на чертеже или в технической документации. Обозначения верхних и нижних границ параметра в этих случаях указываются без индексов max, min.

На полном графическом символе (знаке шероховатости, волнистости, первичного профиля) установлены обязательные позиции (места) различных требований к структуре поверхности (рис. 5). Они необходимы для установления связи между требованиями к структуре поверхности и ее функциональным назначением, а также для выбора измерительного прибора. Насколько сильна корреляция между параметром структуры и функцией поверхности, а также какие параметры подходят для контроля специальной функции поверхности, следует смотреть в литературных данных или использовать имеющийся опыт. Как правило, структура

поверхности определяется в полосе пропускания (в диапазоне длин волн между двумя определенными фильтрами).



Рис. 5. Обозначение элементов, определяющих требования к структуре поверхности на чертежах [12]:
а — в виде текста; б — графически

Как отмечено выше, стандарт ISO 4288 определяет ряд значений по умолчанию для некоторых параметров, используемых при назначении требований к структуре поверхности. Значения этих параметров следует применять, если не указано иное. Например, для оценки параметров шероховатости по умолчанию используется пять базовых длин $l_n = 5l_r$. В табл. 2 отражена взаимосвязь [11, 13–15] между длинами волн отсечки λ_c и λ_s , радиусом острия щупа r и максимальной базовой длиной l_r . Фильтры профиля λ_c и λ_s определяют полосу пропускания для профилей шероховатости.

При изготовлении детали базовая длина для измерения указывается в обозначении структуры поверхности на чертеже. Наиболее часто употребляемая базовая длина составляет 0,8 мм. При необходимости выбор l_r следует осуществлять с учетом требуемых свойств структуры и измеряемых характеристик.

В табл. 3–5 приведены рекомендации [9] по выбору отсечки шага λ_c и измерению параметров структуры поверхности в зависимости от способа обработки и требований к параметрам структуры поверхности.

Таблица 2

Связь между λ_c , λ_s , r и l_r

λ_c , мм	λ_s , мкм	Соотношение λ_c/λ_s	r , мкм	l_r , мм
0,08	2,5	30	2	0,5
0,25	2,5	100	2	0,5
0,80	2,5	300	2	0,5
2,50	8,0	300	5	1,5
8,00	25	300	10	5,0

Таблица 3

Базовая длина l_r и длина оценки l_n для измерения R_a , R_q , R_{sk} , R_{ku} , $R_{\Delta q}$, кривых и связанных с ними параметров для непериодических профилей

R_a , мкм	l_r , мм	l_n , мм
0,006–0,02	0,08	0,40
0,02–0,1	0,25	1,25
0,1–2,0	0,80	4,00
2,0–10,0	2,50	12,50
10,0–80,0	8,00	40,00

Таблица 4

Базовая длина l_r и длина оценки l_n для измерения R_z , R_v , R_p , R_c и R_t непериодических профилей

R_z , R_{z1_max} , мкм *	l_r , мм	l_n , мм
0,025–0,1	0,08	0,40
0,1–0,5	0,25	1,25
0,5–10,0	0,80	4,00
10,0–50,0	2,50	12,50
50,0–200,0	8,00	40,00

* R_z используется при измерении R_z , R_v , R_p , R_c и R_t , а R_{z1_max} — только при измерении R_{z1_max} , R_{v1_max} , R_{p1_max} , R_{c1_max} .

Таблица 5

Базовая длина l_r и длина оценки l_n для измерения R -параметров шероховатости периодических профилей и RS_m для периодических и непериодических профилей

RS_m , мкм	l_r , мм	l_n , мм
0,013–0,04	0,08	0,40
0,04–0,13	0,25	1,25
0,13–0,40	0,80	4,00
0,40–1,30	2,50	12,50
1,30–4,00	8,00	40,00

3. ПРИМЕРЫ НАЗНАЧЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К СТРУКТУРЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

В табл. 6 приведены требования к структуре поверхности и примеры их обозначения в технической документации [12, 15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенных исследованиях отражена взаимосвязь между длинами волн отсечки, радиусом острия щупа и максимальной

базовой длиной. Представлены рекомендации по выбору отсечки шага и измерению параметров структуры поверхности в зависимости от способа обработки и требований к параметрам структуры поверхности. Это дает возможность более качественно использовать международные стандарты ISO 4288:1996 и ISO 1302:2002 для указания параметров геометрической структуры поверхности в соответствии с национальным стандартом Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 4287–2014.

Таблица 6

Примеры обозначения установленных требований

Требование	Пример
<p>Шероховатость поверхности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – двустороннее ограничение параметра; – верхний предел $R_a = 55 \text{ мкм}$; – нижний предел $R_a = 6,2 \text{ мкм}$; – допуски на приведенные согласно «16 %-му правилу» параметры по умолчанию (ISO 4288); – полоса пропускания $0,008\text{--}4 \text{ мм}$; – длина оценки по умолчанию ($5 \times 4 \text{ мм} = 20 \text{ мм}$) (ISO 4288); – направление неровностей — круговое вокруг центра; – процесс обработки — фрезерование. <p>Примечание. U и L не указаны, потому что нет никаких сомнений по границам параметра</p>	<p>фрезерование</p> <p>$\nabla \square 0,008\text{--}4 / R_a 55$</p>
<p>Шероховатость на всех поверхностях, кроме одной:</p> <ul style="list-style-type: none"> – один верхний предел параметра; – $R_z = 6,1 \text{ мкм}$; – допуск в соответствии с «16 %-м правилом» по умолчанию (ISO 4288); – полоса пропускания по умолчанию (ISO 4288 и ISO 3274); – длина оценки по умолчанию ($5 \times \lambda_c$) (ISO 4288); – направление неровностей — нет требований; – при обработке удалить материал поверхности с различными требованиями к шероховатости поверхности. <p>Поверхность с другим требованием по шероховатости:</p> <ul style="list-style-type: none"> – один верхний предел параметра; – $R_a = 0,7 \text{ мкм}$; – допуск согласно «16 %-му правилу» по умолчанию; – полоса пропускания по умолчанию (ISO 4288 и ISO 3274); – длина оценки по умолчанию ($5 \times \lambda_c$) (ISO 4288); – направление неровностей — нет требований; – при обработке удалить материал 	<p>$\nabla \square R_z 6,1 (\checkmark)$</p>
<p>Шероховатость поверхности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – верхние пределы параметров: <ol style="list-style-type: none"> 1) $R_a = 1,5 \text{ мкм}$; 2) допуск согласно «16 %-му правилу» по умолчанию (ISO 4288); 3) полоса пропускания по умолчанию (ISO 4288 и ISO 3274); 4) длина оценки по умолчанию ($5 \times \lambda_c$) (ISO 4288); 5) $R_{zmax} = 6,7 \text{ мкм}$; 6) допуск по «max-правилу»; 7) полоса пропускания — $2,5 \text{ мм}$ (ISO 3274); 8) длина оценки по умолчанию ($5 \times 2,5 \text{ мм}$); – рельеф поверхности — приблизительно перпендикулярный плоскости проекции; – процесс обработки — шлифование 	<p>шлифование</p> <p>$\nabla \perp -2,5 / R_{zmax} 6,7$</p>
<p>Шероховатость поверхности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – один верхний предел параметра; – $R_z = 1 \text{ мкм}$; – допуск согласно «16 %-му правилу» по умолчанию (ISO 4288); – полоса пропускания по умолчанию (ISO 4288 и ISO 3274); – длина оценки по умолчанию ($5 \times \lambda_c$) (ISO 4288); – направление неровностей — нет требований; – поверхностная обработка — покрытие никель/хром; – требование справедливо для всех поверхностей, представленных в закрытом контуре 	<p>$\nabla \circ Fe/Ni20p Cr r$</p> <p>$R_z 1$</p>

Окончание табл. 6

Требование	Пример
<p>Шероховатость поверхности:</p> <ul style="list-style-type: none"> один односторонний верхний и один двусторонний параметры: <ol style="list-style-type: none"> односторонний: <ul style="list-style-type: none"> $R_a = 3,1 \text{ мкм}$; допуск согласно «16 %-му правилу» по умолчанию (ISO 4288); полоса пропускания — 0,8 мм (λ_s в соответствии с ISO 3274); длина оценки $5 \times 0,8 = 4 \text{ мм}$ (ISO 4288); двусторонний R_z: <ul style="list-style-type: none"> верхний предел параметра $R_z = 18 \text{ мкм}$; нижний предел параметра $R_z = 6,5 \text{ мкм}$; для обоих: полоса пропускания — 2,5 мм (λ_s в соответствии с ISO 3274); для обоих: длина оценки $5 \times 2,5 = 12,5 \text{ мм}$; <p>(символы U и L должны быть указаны, даже если нет никаких сомнений);</p> <ul style="list-style-type: none"> поверхностная обработка — покрытие никель/хром 	
<p>Обозначение структуры поверхности и размеров могут быть объединены с использованием той же размерной линии. Шероховатость поверхности на боковых поверхностях паза:</p> <ul style="list-style-type: none"> один верхний предел параметра; $R_a = 6,5 \text{ мкм}$; допуск согласно «16 %-му правилу» по умолчанию (ISO 4288); длина оценки по умолчанию ($5 \times \lambda_c$) (ISO 3274); полоса пропускания по умолчанию (ISO 4288 и ISO 3274); направление неровностей — нет требований; процесс обработки должен удалить материал. 	
<p>Шероховатость поверхности материала на фаске:</p> <ul style="list-style-type: none"> один верхний предел параметра; $R_a = 2,5 \text{ мкм}$; допуск согласно «16 %-му правилу» по умолчанию (ISO 4288); длина оценки по умолчанию ($5 \times \lambda_c$) (ISO 3274); полоса пропускания по умолчанию (ISO 4288 и ISO 3274); направление неровностей — нет требований; процесс обработки должен удалить материал 	
<p>Структура поверхности и размеры могут быть указаны:</p> <ul style="list-style-type: none"> вместе на расширенной размерной линии; раздельно на соответствующей линии проекции и размерной линии. <p>Требования по шероховатости для всех трех поверхностей, представленных на примере:</p> <ul style="list-style-type: none"> один верхний предел параметра; соответственно $R_a = 1,5 \text{ мкм}$, $R_a = 6,2 \text{ мкм}$, $R_z = 50 \text{ мкм}$; допуск согласно «16 %-му правилу» по умолчанию (ISO 4288); длина оценки по умолчанию ($5 \times \lambda_c$) (ISO 3274); полоса пропускания по умолчанию (ISO 4288 и ISO 3274); направление неровностей — нет требований; процесс обработки должен удалить материал 	
<p>Обозначение структуры поверхности, размеров и обработки.</p> <p>Пример, иллюстрирующий три последовательных процесса обработки.</p> <p>Этап 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> один верхний предел параметра; $R_z = 1,7 \text{ мкм}$; допуск согласно «16 %-му правилу» по умолчанию (ISO 4288); длина оценки по умолчанию ($5 \times \lambda_c$) (ISO 3274); полоса пропускания по умолчанию (ISO 4288 и ISO 3274); направление неровностей — нет требований; процесс обработки должен удалить материал. <p>Этап 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> нет требований к структуре поверхности, за исключением хромирования. <p>Этап 3:</p> <ul style="list-style-type: none"> один верхний параметр, действителен только на первых 50 мм от торцевой поверхности цилиндра; $R_z = 6,5 \text{ мкм}$; допуск согласно «16 %-му правилу» по умолчанию (ISO 4288); длина оценки по умолчанию ($5 \times \lambda_c$) (ISO 3274); полоса пропускания по умолчанию (ISO 4288 и ISO 3274); направление неровностей — нет требований; процесс обработки — шлифование 	



Литература

- ГОСТ Р ИСО 4287–2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. Москва : Стандартинформ, 2015. 18 с.
- ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Москва : Стандартинформ, 2018. 6 с.
- ГОСТ 2.309–73. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Обозначения шероховатости поверхностей. Москва : Стандартинформ, 2007. 15 с.
- Табенкин А. Н., Тарасов С. Б., Степанов С. Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / Под ред. Н. А. Табачниковой. Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического университета, 2007. 136 с.
- Лич Р. Инженерные основы измерений нанометровой точности : учебное пособие. Долгопрудный : Интеллект, 2012. 400 с.
- Анализ международной практики профильной и трехмерной оценки шероховатости поверхности / В. М. Давыдов, В. В. Заев, П. Н. Паночевский [и др.] // Ученые заметки ТОГУ: электронное научное издание. 2013. Т. 4. № 4. С. 1061–1074. ISSN 2079–8490. URL: http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2013/TGU_4_199.pdf (дата обращения: 27.11.2019).
- Захарова Н. В. Характеристика параметров шероховатости, установленных в международных стандартах ИСО // Решетневские чтения. 2015. Т. 1. С. 458–460. ISSN 1990–7702.
- Гвоздев В. Д. Основы взаимозаменяемости: размерные и геометрические допуски : учебное пособие. Москва : РУТ (МИИТ), 2017. 88 с.
- Парфеньева И. Е., Зайцев С. А., Вячеславова О. Ф. Нормирование геометрических характеристик изделий: современный подход : учебное пособие. Москва : ИНФРА-М, 2018. 270 с.
- Камкин А. Н., Иванов И. А. Особенности профильной оценки шероховатости поверхности деталей машин // Современные технологии, применяемые при обслуживании и ремонте автомобилей : сборник трудов III национальной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых / ПГУПС. Санкт-Петербург, 2019. С. 12–16.
- ISO 4288:1996. Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture.
- ISO 1302:2002. Geometrical Product Specifications (GPS) — Indication of surface texture in technical product documentation.
- ISO 3274:1996. Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instruments.
- ISO 11562:1996. Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Metrological characteristics of phase correct filters.
- Quick Guide to Surface Roughness Measurement / Mitutoyo America Corporation. 2016. Bulletin No. 2229. URL: https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2012/11/1984_Surf_Roughness_PG.pdf (дата обращения: 01.12.2019).
- Буйносов А. П., Стаценко К. А., Тихонов В. А. Совершенствование методики контроля шероховатости посадочной поверхности бандажей колесных пар локомотивов // Вестник УрГУПС. 2011. № 4 (12). С. 23–30. ISSN 2079–0392.
- Буйносов А. П. Методы повышения ресурса колесных пар тягового подвижного состава : монография. Москва : УМЦ ЖДТ, 2010. 224 с.

References

- GOST R ISO 4287–2014. Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters [Geometricheskie kharakteristiki izdeliy (GPS). Struktura poverkhnosti. Profil'nyy metod. Terminy, opredeleniya i parametry strukturny poverkhnosti]. Moscow : Standardinform, 2015. 18 p.
- GOST 2789–73. Surface roughness. Parameters and characteristics [Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry i kharakteristiki]. Moscow : Standardinform, 2018. 6 p.
- GOST 2.309–73. Designations system for design documentation. Designations of surface finish [Edinaya sistema konstruktorskoy dokumentatsii (ESKD). Oboznacheniya sherkhovatosti poverkhnostey]. Moscow : Standardinform, 2007. 15 p.
- Tabenkin A. N., Tarasov S. B., Stepanov S. N. Roughness, undulation, profile. International experience [Sherokhovatost', volnistost', profil']. Mezdunarodnyy optyt] / Ed. by N. A. Tabachnikova. St. Petersburg : Publishing House of Polytech, 2007. 136 p.
- Leach R. Fundamental principles of engineering nanometrology [Inzhenernye osnovy izmereniy nanometrovoy tochnosti] : textbook. Dolgoprudny : Intellect, 2012. 400 p.
- Analysis of international practice profile and three-dimensional evaluation of surface roughness [Analiz mezdunarodnoy praktiki profil'noy i trekhmernoy otseki sherkhovatosti poverkhnosti] / V. M. Davydov, V. V. Zayev, P. N. Panochevnyi et al. // Electronic scientific journal «Scientists notes PNU». 2013. Vol. 4. No. 4. Pp. 1061–1074. ISSN 2079–8490. URL: http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2013/TGU_4_199.pdf (access date: 27.11.2019).
- Zakhарова Н. В. The characteristic of parameters of surface roughness in accordance with the requirements of ISO standards [Kharakteristika parametrov sherkhovatosti, ustanovlennyykh v mezhdunarodnykh standartakh ISO] // Reshetnev Readings. 2015. Vol. 1. Pp. 458–460. ISSN 1990–7702.
- Gvozdev V. D. Basics of interchangeability: dimensional and geometrical tolerances [Osnovy vzaimozamenyayemosti: razmernye i geometricheskie dopuski]: textbook. Moscow : RUT (MIIT), 2017. 88 p.
- Parfenyeva I. E., Zaytsev S. A., Vyacheslavova O. F. Regulation of geometrical characteristics of parts: modern approach [Normirovanie geometricheskikh kharakteristik izdeliy: sovremenyy podkhod] : textbook. Moscow : INFRA-M, 2018. 270 p.
- Kamkin A. N., Ivanov I. A. Peculiarities of profile assessment of machine parts surface roughness [Osobennosti profil'noy otsenki sherkhovatosti poverkhnosti detaley mashin] // Modern technologies that are used at maintenance and repair of motor cars : proceedings of the III National interuniversity scientific and technical conference of students, undergraduate and postgraduate students and young scientists / PSTU. St. Petersburg, 2019. Pp. 12–16.
- ISO 4288:1996. Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture.
- ISO 1302:2002. Geometrical Product Specifications (GPS) — Indication of surface texture in technical product documentation.
- ISO 3274:1996. Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instruments.
- ISO 11562:1996. Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Metrological characteristics of phase correct filters.
- Quick Guide to Surface Roughness Measurement / Mitutoyo America Corporation. 2016. Bulletin No. 2229. URL: https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2012/11/1984_Surf_Roughness_PG.pdf (access date: 01.12.2019).
- Buinsov A. P., Statsenko K. A., Tikhonov V. A. Improvement of control technique of mounting surface roughness of engine wheel pairs tires [Sovrshennostvovaniye metodiki kontrolya sherkhovatosti posadochnoy poverkhnosti bandazhey kolesnykh par lokomotivov] // Herald of USURT. 2011. No. 4 (12). Pp. 23–30. ISSN 2079–0392.
- Buinsov A. P. Methods for increasing the lifecycle of traction rolling stock wheelsets [Metody povysheniya resursa kolesnykh par tyagovogo podvizhnogo sostava] : monograph. Moscow : UMTs ZhDT, 2010. 224 p.



УДК 629.423.32

Николай Николаевич Андросов, кандидат технических наук, доцент,
главный конструктор ООО «Тяговые компоненты», Екатеринбург, Россия,

Игорь Станиславович Цихалевский, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая тяга»
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

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

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМ ЧИСЛОМ ФАЗ

Nikolay Nikolaevich Androsov, PhD in Engineering, Associate Professor, Chief Designer,
Traction Components LLC, Ekaterinburg, Russia,

Igor Stanislavovich Tsikhalevskiy, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Traction Department,
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Konstantin Andreevich Vakhrushev, postgraduate student, Electric Traction Department,
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Analysis of possibility of application of induction motors with various number of phases

Аннотация

В статье проанализированы эксплуатационные показатели электровозов с коллекторными и асинхронными тяговыми двигателями. Установлено, что из-за свойственных коллекторным двигателям ограничений электровозы могут работать с номинальной мощностью в диапазоне скоростей движения 51,2–79 км/ч, а при максимальной скорости 100 км/ч мощность не превышает 68 % от номинальной. Для повышения их энергоэффективности предложено в несколько раз расширить диапазон скоростей движения при постоянной номинальной мощности и максимально снизить работу в режимах перегрузки. В асинхронных тяговых двигателях ограничительные пределы для электромагнитных, тепловых и механических нагрузок существенно шире. Выполненный расчет потерь в преобразователе фаз и частоты для асинхронных тяговых двигателей с различным числом фаз показал, что суммарные потери при трехфазном двигателе достигают 1,9 %, а при двигателе с четным числом фаз не превышают 0,8 %. Сделан вывод, что предпочтительно использовать тяговый двигатель с восьмифазной обмоткой.

Ключевые слова: электровоз, коллектор, двигатель, фильтр, скорость, обмотка, процесс.

Summary

The paper analyses operational indicators of electric locomotives with commutator and induction motor traction motors. It is established that, due to the inherent limitations of the commutator motors, electric locomotives can work with rated power in speed range of 51.2–79 km/h, at maximum speed of 100 km/h power doesn't exceed 68 % of rated. In order to increase the energy efficiency the authors have proposed to widen by several times the speed range at a constant rated power and reduce as much as possible operation at overload modes. Induction motors have significantly wider ranges for electromagnetic, thermal and mechanical loads. The calculation of losses in converter of phases and frequency for induction motors with various number of phases showed that total losses of three-phase motor reach 1.9 %, losses of motor with even number of phases doesn't exceed 0.8 %. As a result, it is preferable to use traction motors with 8-phase winding.

Keywords: electric locomotive, commutator, motor, filter, speed, winding, process.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-70-73

Эксплуатационные показатели электровоза существенно зависят от того, какая часть общего времени работы приходится на режимы с нагрузкой, близкой к номинальной. Например, электровозы ВЛ10 и ВЛ11, которые составляют большую часть парка эксплуатируемых электровозов постоянного тока, имеют следующие показатели в номинальном режиме:

скорость движения в длительном режиме — 51,2 км/ч;

мощность тягового двигателя в длительном режиме — 575 кВт;

КПД тягового привода без учета вентиляции двигателей — 0,9.

Причем из-за свойственных коллекторным двигателям ограничений эти электровозы могут работать с номинальной мощностью в диапазоне скоростей 51,2–79 км/ч, а при максимальной скорости 100 км/ч мощность не превышает 68 % от номинальной.

Рассматриваемые электровозы при движении со скоростями менее 51,2 км/ч будут работать в режиме тяги с КПД значительно ниже 0,9. При этом снижение КПД за счет роста потерь будет происходить в большей степени в режимах перегрузки по току.

Соответственно такие электровозы нельзя считать современными по энергетической эффективности. Для ее повышения в первую очередь необходимо в несколько раз расширять диапазон скоростей движения при постоянной номинальной мощности и максимально снижать работу в режимах перегрузки.

Из-за свойственных коллекторным двигателям ограничений рассматриваемые электровозы могут работать с номинальной мощностью в диапазоне скоростей движения. В асинхронных тяговых двигателях благодаря отсутствию щеточно-коллекторного узла и лучшим условиям охлаждения якоря (статора) ограничительные пределы для электромагнитных, тепловых и механических нагрузок существенно расширяются [1].

На рис. 1 представлены результаты расчетов зависимостей [2] массы поезда и мощности тягового двигателя от скорости движения в номинальном режиме электровоза с 8 осями и массой 200 т для расчетного подъема 8 %.

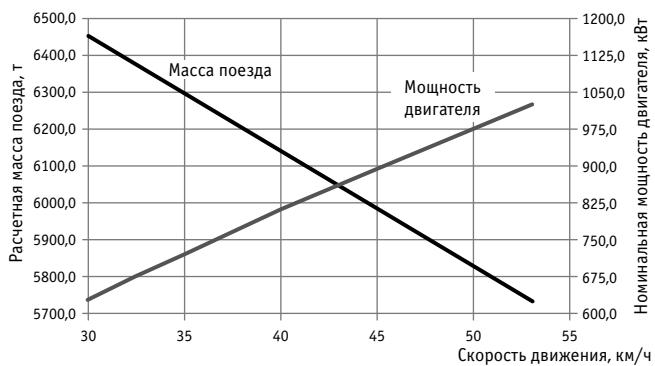


Рис. 1. Зависимость массы поезда и номинальной мощности двигателя от скорости

При расчетах принято, что мощность двигателя определяется ограниченной сцеплением силой тяги при заданной скорости, а масса поезда определяется силой тяги и скоростью номинального режима (без перегрузки по току). Результаты расчета показывают, что с увеличением скорости номинального режима масса поезда снижается, а мощность двигателярастет.

Для грузового электровоза при максимальной скорости движения 120 км/ч рационально принять скорость номинального режима 40 км/ч, при этом мощность тягового двигателя составит 810 кВт, а расчетная масса состава — 6140 т. Диапазон регулирования при постоянной мощности составит 3-кратное изменение скорости (от 40 до 120 км/ч).

В рационально спроектированных машинах КПД в номинальном режиме несколько меньше максимального [3]. При изменении нагрузки вниз от номинального значения обычно КПД сначала несколько возрастает, а потом снижается и при мощности до 0,55–0,65 от номинальной становится равным номинальному значению.

Работу тягового привода в диапазоне скоростей от номинальной до максимальной с КПД не ниже номинального значения можно обеспечить, если в зависимости от скорости движения и профиля пути изменять количество включенных двигателей. При этом нагрузка двигателей должна находиться в указанном выше диапазоне.

При скорости движения ниже 40 км/ч в непродолжительном пусковом режиме КПД тягового привода будет иметь пониженные значения.

Использование в тяговом приводе электровоза асинхронных тяговых двигателей позволит при небольшом количестве

пусков обеспечить работу электровоза с эксплуатационным КПД, близким к значению номинального режима.

Существенно повысить энергетическую эффективность такого электровоза по сравнению с электровозом с коллекторными двигателями возможно, если суммарный КПД асинхронного двигателя, преобразователя частоты и напряжения, а также входного фильтра будет близок к значению, характерному для коллекторных двигателей.

Применение в промышленных приводах трехфазных двигателей обусловлено не их свойствами, а преимуществами трехфазной системы в производстве, передаче и распределении электрической энергии.

В частотно-регулируемом тяговом приводе трехфазные асинхронные двигатели применяют лишь в силу инерции.

При нечетном числе фаз может быть использована только схема питания с соединением фазных обмоток в звезду. Это снижает фазное напряжение трехфазного тягового двигателя в номинальном режиме до 1200 В.

При четном числе фаз может применяться индивидуальное питание фазных обмоток, и при равных условиях фазное напряжение составит 2100 В. Повышение фазного напряжения и числа фаз приводит к значительному уменьшению фазного тока. Увеличение числа фаз до 4 снижает фазный ток в 2,33 раза, а до 8 фаз — в 4,66 раза.

Модули IGBT, применяемые в преобразователях числа фаз и частоты (ПЧ), характеризуются пропорциональной зависимостью от тока потерь во включенном состоянии и близкой к таковой для потерь при включении и выключении. Поэтому снижение выходного тока ПЧ при увеличении числа фаз ведет к снижению в нем потерь и повышению его КПД.

Для количественной оценки потерь в ПЧ были проведены электромагнитные расчеты тяговых двигателей мощностью 800 кВт с числом фаз 3, 4 и 8, одинаковыми размерами магнитной системы и максимально близкими значениями магнитных потоков и плотности токов в обмотках. По полученным расчетным параметрам схемы замещения двигателя с помощью математической модели «ПЧ — двигатель» определены потери в преобразователе. Результаты расчетов для номинальной мощности при номинальной и максимальной частоте приведены в табл. 1.

Для трехфазного двигателя в расчетах рассматривались два варианта широтно-импульсной модуляции (ШИМ): векторная (применяемая обычно) и оптимальная.

Расчеты показали, что двигатели с четным числом фаз обеспечивают потери в ПЧ приблизительно в 2 раза меньше трехфазного при примерно одинаковой загрузке ключей током, а потери, которые приходятся на один ключ и определяют его тепловой режим, при четырех фазах меньше в 5 раз, а при восьми фазах — почти в 8 раз.

Суммарные потери в ПЧ при трехфазном двигателе достигают 1,9 %, а при двигателе с четным числом фаз не превышают 0,8 %.

Следует отметить, что при максимальном номинальном токе модулей IGBT 65 класса 750 А питание двух двигателей мощностью 800 кВт от одного ПЧ невозможно. При двигателе с четным числом фаз возможно параллельное включение на один ПЧ двух или трех таких двигателей.



Таблица 1

Результаты расчетов потерь в преобразователе числа фаз
и частоты при двигателях с различным числом фаз

Число фаз и номинальные данные двигателя	Номинальный ток модуля IGDT, А	Количество модулей в ПЧ	Коэффициент загрузки модуля по току	Мощность, потери в ПЧ при номинальной частоте 50 Гц, кВт	Мощность, потери в ПЧ при максимальной частоте 150 Гц, кВт	Примечание
Три фазы $U_\Phi = 1200$ В $I_\Phi = 275$ А	750	6	0,367	9,440 8,470	14,950 9,650	Векторная ШИМ Оптимальная ШИМ
Четыре фазы $U_\Phi = 2100$ В $I_\Phi = 118$ А	400	8	0,59	6,141	6,482	Оптимальная ШИМ
Восемь фаз $U_\Phi = 2100$ В $I_\Phi = 59$ А	250	16	0,734	2,329	3,168	Оптимальная ШИМ

Для асинхронного двигателя с короткозамкнутой стержневой обмоткой (беличья клетка), которая применяется чаще всего, характерно существенное увеличение добавочных потерь, возникающих от зубцовых пульсаций потока в роторе. В рассматриваемом варианте тягового привода двигатель большую часть времени будет работать при частотах, значительно превышающих номинальную, и частота указанных пульсаций будет достигать нескольких килогерц, а добавочные потери при традиционной конструкции обмотки ротора в несколько раз превысят основные.

При проектировании асинхронного тягового двигателя необходимо принять специальные меры для снижения добавочных потерь в обмотке ротора.

Короткозамкнутая обмотка может быть выполнена в виде фазной обмотки [4]. При таком исполнении обмотки ротора за счет выбора числа пазов и укорочения шага можно свести к минимуму высокочастотные пульсации потока, сцепленного с катушкой ротора, и в значительной степени уменьшить добавочные потери.

Важная особенность асинхронного тягового двигателя — высокая жесткость его механической характеристики, что радикально отличает тяговые свойства электровоза с такими двигателями от электровоза с коллекторными двигателями. У последних из-за невысокой жесткости механических характеристик, обусловленной свойствами двигателей и их последовательным включением, процессы боксования и юза с течением времени отличаются постепенным значительным снижением силы тяги и ростом скорости скольжения колесной пары. У электровозов с асинхронным двигателем в случае потери сцепления (из-за большой жесткости характеристики и большой разности между электромагнитной постоянной времени двигателя с ПЧ и механической постоянной времени колесно-моторного блока) будет возникать колебательный процесс развития и прекращения боксования. При этом с невысокой часто-

той и амплитудой изменяется скольжение, врачающий момент двигателя и скорость проскальзывания колесной пары, а сила тяги оси сохранится на достаточно высоком уровне.

В силу указанных особенностей процессов боксования и юза при низкой эффективности соответствующей защиты у грузового электровоза с асинхронными тяговыми двигателями в одинаковых условиях эксплуатации может происходить более интенсивный износ бандажей колесных пар по сравнению с электровозом с коллекторными двигателями.

Выявить достоверно такой процесс путем контроля частоты вращения ротора двигателя или колесной пары практически невозможно, поскольку возникающие отклонения частоты вращения сопоставимы по величине с погрешностью измерения. Рациональнее всего на электровозе с асинхронными тяговыми двигателями защиту от боксования и юза строить на контроле колебаний мощности, потребляемой двигателем.

Система управления электровозом не должна использовать режим, который предусматривает стабилизацию момента двигателей или силы тяги. Включение в систему управления регулятора этих параметров ведет к усугублению процессов боксования и юза, так как регулятор при нарушении сцепления будет пытаться увеличивать силу тяги или торможения. В системе управления электровозом должно использоваться лишь ограничение указанных параметров.

При проектировании асинхронного тягового двигателя за счет применения электротехнической стали с низкими потерями и мероприятий по снижению добавочных потерь реально в диапазоне рабочих частот до 180–200 Гц получить КПД на уровне 95 %.

При питании от ПЧ работа асинхронных тяговых двигателей с различным числом фаз при одинаковых нагрузках и рабочей частоте тока будет сопровождаться различными по амплитуде и частоте пульсациями входного тока ПЧ, что обуславлит разницу в требованиях к входному фильтру.



Относительная величина пульсации входного тока ПЧ от основной гармоники фазного тока, если принять за единицу амплитуду пульсаций при трехфазном двигателе, составит для четырехфазного двигателя 1,03, для восьмифазного — 0,12. Частота пульсации входного тока ПЧ при трехфазном двигателе будет превышать основную частоту в 6 раз, при четырехфазном — в 4 раза, а при восьмифазном — в 8 раз.

При одинаковой для этих случаев величине переменной составляющей входного тока габаритный параметр входного фильтра (произведение $L \cdot C$) по сравнению с трехфазным двигателем вырастет для четырехфазного двигателя в 2,3 раза и снизится для восьмифазного в 15 раз.

Таким образом, выполненный анализ показывает, что по величине потерь в ПЧ и габаритам фильтра предпочтительнее использование тягового двигателя с восьмифазной обмоткой.

Литература

1. Тяговые электродвигатели электровозов / Под ред. В. Г. Щербакова. Новочеркасск : Наутилус, 1998. 672 с.
2. Гребенюк П. Т., Долганов А. Н., Скворцова А. Н. Тяговые расчеты : справочник / Под ред. П. Т. Гребенюка. Москва : Транспорт, 1987. 272 с.
3. Копылов И. П. Электрические машины : учебник. Москва : Энергоатомиздат, 1986. 360 с.
4. Домбровский В. В., Хуторецкий Г. М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. Ленинград : Энергия, 1974. 504 с.

References

1. Traction motors of electric locomotives [Tyagovye elektrosvigateli elektrovozov] / Ed. by V. G. Shherbakov. Novocherkassk : Nautilus, 1998. 672 p.
2. Grebenyuk P. T., Dolganov A. N., Skvortsova A. N. Traction calculations [Tyagovye raschety] : handbook / Ed. by P. T. Grebenyuk. Moscow : Transport, 1987. 272 p.
3. Kopylov I. P. Electric machines [Elektricheskie mashiny] : textbook. Moscow : Energoatomizdat, 1986. 360 p.
4. Dombrovskiy V. V., Khutoretskiy G. M. Basics of designing of alternating current electric machines [Osnovy proektirovaniya elektricheskikh mashin peremennogo toka]. Leningrad : Energy, 1974. 504 p.

Объем статьи 0,4 авторских листа

УДК 621.331:338.001.36

Борис Алексеевич Аржаников, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Владимир Алексеевич Кокшаров, доктор экономических наук, профессор кафедры «Экономика транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМЕ ОБОСНОВАНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Boris Alexeevich Arzhannikov, DSc in Engineering, Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Vladimir Alexeevich Koksharov, DSc in Economics, Professor, Transport Economics Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Conceptual approach to problem of economic efficiency substantiation of three-phase alternating current system of electric traction

Аннотация

Предложен концептуальный подход к обоснованию экономической эффективности системы электрической тяги трехфазного переменного тока по сравнению с системой электрической тяги однофазного переменного тока. В его основе лежат квазиоптимальные значения показателей системы электрической тяги, необходимые для технико-экономического сравнения и оценки интегрального критерия эффективности, для которой, в свою очередь, требуется сопоставление систем по приведенным затратам. Экономия приведенных затрат должна также учитывать внештранспортный эффект, что очень важно для системного эффекта взаимодействия железнодорожного транспорта с предприятиями отраслей экономики.

Ключевые слова: экономический эффект, приведенные затраты, система электрической тяги, капитальные затраты, текущие затраты.

Summary

The paper proposes a conceptual approach to economic efficiency substantiation of three-phase alternating current system of electric traction in comparison with one-phase alternating current system of electric traction. It is based on quasi-optimal values of indicators of electric traction system that are necessary for feasibility study and assessment of integral criterion of efficiency, for which, in turn, it is necessary to compare systems by reduced expenditures. Saving of reduced expenditures should also consider out-of-transport effect that is very important for system effect of interaction between railway transport and other enterprises.

Keywords: economic effect, reduced expenditures, system of electric traction, capital expenditures, current expenditures.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-74-79

Известно, что расход электроэнергии электровозов переменного тока выше, чем у электровозов постоянного тока. Но это компенсируется более высокой скоростью [1, 2], что дает несравнимые преимущества при развитии экономики предприятий: скоростные характеристики обеспечивают качество транспортного обслуживания, результативно влияют на сокращение производственных циклов при выпуске продукции и оказании услуг в условиях развитой кооперации и тем самым обеспечивают повышение эффективности оборотных средств. Однако на сегодняшний день таких технико-энергетических расчетов нет, а их необходимость очевидна. Это лишний раз доказывает, что обоснование эффективности трехфазной системы электрической тяги переменного тока требует комплексной методики, позволяющей учитывать взаимосвязь и влияние качества транспортных услуг на промышленное производство.

Предыстория проблемы следующая. Все возрастающая необходимость в повышении мощности электровозов при низком напряжении привела к значительному увеличению тока их двигателей, что, в свою очередь, вызвало увеличение потерь электрической энергии в двигателях локомотивов и в питающих проводах. Для снижения потерь электроэнергии в питающих проводах было увеличено их сечение и уменьшено расстояние между пунктами питания, что привело к увеличению количества преобразовательных пунктов питания (тяговых подстанций).

Другой путь увеличения мощности локомотива мог быть осуществлен за счет повышения напряжения в питающих проводах, т.е. на локомотивах. Однако этот путь в системе постоянного тока был связан со сложностью снижения напряжения на двигателе до уровня напряжения, ограниченного конструкцией и изоляцией в коллекторном узле (габаритом в пределах колесной тележки).



После этого была предложена замена системы электрической тяги постоянного тока на систему электрической тяги переменного тока [3].

Основными направлениями развития электрической тяги переменного тока стали разработка тягового электродвигателя и выбор системы тягового электроснабжения.

Тяговый электрический двигатель переменного тока допускает высокое напряжение в контактной сети, но с установкой на локомотиве понижающего трансформатора, простейшего, надежного в работе, с высоким КПД. Введение высокого напряжения переменного тока снижает потери электрической энергии в контактной сети и повышает передачу электрической мощности локомотиву [4]. Таким образом, тяговый электрический двигатель переменного тока в сравнении с двигателем постоянного тока имеет экономические преимущества за счет экономии электроэнергии в контактной сети и повышения потенциальной мощности парка локомотивов для организации движения скоростных и тяжеловесных поездов.

В настоящее время потенциал электрического двигателя переменного тока в скоростных и тяжеловесных поездах недостаточно реализован и, несмотря на свое очевидное преимущество, требует методического обоснования и доказательства эффективности.

Основные причины отказа от трехфазной системы электрической тяги с двухполюсной воздушной линией (тем более с трехполюсной) связаны с трудностями токосъема при больших скоростях движения, ограничениями междуфазных расстояний при высоких напряжениях, сложными устройствами воздушных стрелок двух контактных проводов, отсутствием или слабым развитием элементов электронной полупроводниковой техники средств автоматики и телемеханики [4].

Доктор технических наук А. В. Котельников [5] определил четкие позиции при сопоставлении выбора вариантов систем электрической тяги. По его мнению, кроме внутрисистемных показателей электроснабжения и электроподвижного состава, например таких, как потери и расход электрической энергии, «необходимо учитывать сопутствующие составляющие, которые при сравнении оказываются более существенными», что позволяет объективно оценивать сравниваемые варианты.

Опыт применения в России систем электрической тяги постоянного и переменного токов свидетельствует о преимущественном использовании системы однофазного переменного тока напряжением 25 кВ 50 Гц.

Так, капитальные затраты [5] на электрификацию при переменном токе на 15–18 % ниже, чем на постоянном; в 2–3 раза сокращается число тяговых подстанций; экономия меди при более легкой контактной подвеске составляет более 2 т на 1 км; снимается проблема износа контактных проводов и их периодической замены; исключается электрокоррозия опор контактной сети и подземных металлических сооружений. Электрифицированные участки переменного тока имеют меньшие на 5–6 % суммарные потери электроэнергии на тягу. При равных объемах перевозочной работы на участках переменного тока требуется на 15–20 % меньше электровозов и локомотивных бригад. Снижается повреждаемость устройств электроснабжения переменного тока и электровозов с асинхрон-

ным бесколлекторным приводом. Себестоимость перевозок на участках переменного тока на 20 % меньше, чем на участках постоянного тока. Таким образом, организационно-экономическая эффективность однофазного переменного тока очевидна.

Высокоскоростное движение поездов на магистралях, электрифицированных на постоянном или на однофазном переменном токе, связано в основном с обеспечением надежного взаимодействия токоприемника и контактного провода при соблюдении жестких требований стабильности характеристик всех элементов и устройств железнодорожного хозяйства (путь, подвижной состав, система тягового электроснабжения и др.).

Максимальная достигнутая [5] скорость движения на линиях однофазного переменного тока (Франция, 515,3 км/ч, 1990 г.; Япония, 443 км/ч, 1996 г.; Германия, 407 км/ч, 1988 г.) и постоянного тока (Россия, 230 км/ч, 1998 г.) обеспечена при отборе мощности с расположением токоприемника и контактного провода в горизонтальной плоскости с естественным влиянием его стрелы провеса на качество токосъема. Надежный токосъем при указанных высоких скоростях движения получен «путем значительного (в 2–3 раза) повышения натяжения контактного провода и несущего троса. Это требует создания высокопрочных проводов и тросов, рассчитанных на натяжение 20–30 кН...» [5].

В 1903 г. высокая скорость 210 км/ч в трехфазной системе переменного тока была достигнута при боковом отборе мощности со скольжением полоза токоприемника по боковой поверхности контактного провода, т.е. с относительным расположением токоприемников и проводов воздушных линий в вертикальной плоскости. В этом случае исключается влияние стрелы провеса контактного провода на качество токосъема.

В разрабатываемой трехфазной системе электрической тяги с двумя воздушными линиями (фазами) и рельсов (третья фаза) предусматривается боковой отбор мощности.

Применение трехфазной системы электрической тяги устраняет ряд присущих однофазной системе недостатков, отмеченных профессором Р. Р. Мамошиным [6], среди которых наиболее отрицательное влияние оказывает несимметричный режим однофазной системы электрической тяги на симметричную трехфазную питающую энергосистему.

Другие недостатки трехфазной системы электрической тяги, отмеченные в работах [5–13], устраняются в процессе развития техники и технологий.

При создании электроподвижного состава для грузового движения трехфазной системы электрической тяги используется база существующего локомотивного парка, например электровозы ЭЭС5 [14] и ЭЭС7 [15].

Для повышения работоспособности трехфазной системы электрической тяги в нормальных и экстремальных режимах эксплуатации:

должно быть обеспечено увеличение технико-энергетических показателей относительно однофазной системы электрической тяги переменного тока;

движение поезда не должно прекращаться при снятии питания с одного контактного провода за счет введения резервирования движения по устройствам контактной сети.



Взаимное расположение в горизонтальной плоскости двух контактных проводов фаз *a* и *b* с соблюдением габаритных размеров должно предусматривать возможность производства и упрощения погрузочно-разгрузочных работ.

Усовершенствование трехфазной системы электрической тяги основано на новом порядке взаимодействия контактных проводов и токоприемников локомотива.

Применены устройства и последовательность опускания и подъема токоприемников: при съезде с главного пути станции на боковой путь и наоборот; при пересечении путей двух направлений и при переходе с одного пути на другой.

Локомотивы поездов, находящихся только на путях: съезда с главного пути станции на боковой путь или въезда с бокового пути на главный путь; перехода с пути четного (нечетного) хода на путь нечетного (четного) хода; пересечения одного пересекающего пути с другим (основным) пересекаемым путем, — проходят указанную зону с опущенными токоприемниками, т.е. в режиме «выбега». При этом если по путям съезда (выезда), перехода или в зоне пересекающего пути электровоз проходит с опущенными токоприемниками, то контактная сеть на этих путях не нужна и не монтируется.

После остановки поезда на боковом пути, а затем для въезда на главный путь запас энергии разгона после опускания токоприемников локомотива может не обеспечить въезд, что потребует экспериментальных поездок и решения о необходимости введения на станции локомотива-толкача. В качестве такового может быть использован другой электровоз, но с учетом устройства контактной сети на боковых путях лучшим решением будет использование тепловозной тяги. При этом количество боковых путей для каждого направления (четного и нечетного) определяется потребностью для обеспечения, например, обгона, отстоя при повреждениях и т.п. или принимается не более одного-двух.

На остальных боковых путях, в том числе и на путях со значительным объемом маневровой работы, контактная сеть не монтируется (ликвидируется) с обеспечением работы тепловозной тягой. Снижаются капитальные затраты при монтаже контактной сети на боковых путях станции и соответственно эксплуатационные расходы на ее обслуживание. Кроме того, сокращается находящийся под постоянным контролем удельный расход электрической энергии.

Для сотрудников эксплуатационной службы станции возникают дополнительные трудности, но, с другой стороны, и возможности снижения энергетических затрат при разработке новых технологий маневровой работы.

Предпочтение тепловозной тяге перед электрической отдается и на магистральных направлениях при снижении объема эксплуатационной работы.

На основе вышеизложенных отдельных технико-экономических оценок эффективности трехфазной системы электрической тяги можно предложить следующий методологический подход и модель расчета критерия оценки уровня ее эффективности по отношению к системе однофазного переменного тока.

В соответствии с научно-методологическими основами организации процесса электроснабжения и многочисленными факторами, влияющими на эффективность использования экономических ресурсов, определяющие технико-экономиче-

ские преимущества электроэнергии постоянного или переменного тока при реализации электротяги могут быть сгруппированы в 14 показателей. Причем если трехфазная система переменного тока окажется более эффективной, то соотношение между показателями должно быть именно таким, как в табл. 1. В основе лежит **авторская гипотеза**, что оптимальность этих соотношений обеспечивает экономический эффект преимущества системы электротяги трехфазного переменного тока. Гипотеза опирается на все рассмотренные выше исследования.

При сравнении эффективности электрической тяги трехфазного переменного тока по отношению к однофазному переменному току необходимо опираться на ряд очень важных принципов.

Принцип комплексного подхода — для определения эффективности необходимо учитывать все возможные затраты и ресурсы при системном сравнении двух вариантов, а также *внештранспортный эффект*.

Принцип обеспечения минимального воздействия неполноты и недостоверности имеющейся информации, означающий снижение до возможного минимума погрешности и неполноты информации, а также ее влияния на устойчивость объективно принимаемых решений по выбору одного из двух вариантов системы электрической тяги. Однако следует отметить, что существуют серьезные недостатки формирования железнодорожной статистической отчетности, которые не позволяют обеспечивать репрезентативность выборки и объективность целого ряда показателей.

Принцип сопоставимости результатов, т.е. необходимость обеспечения сравнимости достигаемых социальных, экологических и экономических эффектов за счет функционирования двух вариантов системы электрической тяги. К таким показателям сопоставимости следует отнести равные величины: расход электрической энергии на тягу по счетчикам электровозов $A_{\text{ЭПС3пер.т}} = A_{\text{ЭПС1пер.т}}$ при одинаковой массе $Q_{3\text{пер.т}} = Q_{1\text{пер.т}}$ и технической скорости движения поездов $V_{3\text{пер.т}} = V_{1\text{пер.т}}$.

Принцип многоэтапности определения эффективности системы электрической тяги, т.е. необходимость расчета (с различной глубиной) на каждой стадии разработки, внедрения и реализации мер по системному выбору экономически эффективного варианта системы электрической тяги.

Принцип количественного учета влияния неопределенностей и рисков реализации мер по выбору варианта системы электрической тяги.

Опираясь на принцип многоэтапности определения эффективности электрической тяги, на первом этапе выберем оптимальные значения показателей по отношению к базовой системе электрической тяги на основе исходной гипотезы (см. табл. 1).

На втором этапе выполним оценку интегральной эффективности (табл. 2) электрической тяги трехфазного переменного тока в сравнении с однофазным переменным током на основе оптимальных значений показателей по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{инт}} = 1 - \frac{n}{m}, \quad (1)$$

где n — число неоптимальных соотношений показателей; m — общее количество пар показателей.



Таблица 1

Исходные показатели для технико-экономических оценок при сравнении эффективности электрической тяги трехфазного переменного тока по отношению к однофазному переменному току

Показатель	Классификация затрат	Значение показателя по отношению к базовой однофазной системе электрической тяги	Эффект (изменение расхода) от применения трехфазной системы переменного тока
Скорость доставки грузов и пассажиров	Текущие	$V_{3\text{пер.т}} > V_{1\text{пер.т}}$	$+ \Delta V_{3\text{пер.т}}$
Капитальные вложения на электрификацию железнодорожных путей	Капитальные	$K_{3\text{пер.т}} < K_{1\text{пер.т}}$	$- \Delta K_{3\text{пер.т}}$
Расход электроэнергии $A_{3\text{пс}} + \Delta A_{\text{tc}}$ (потери в тяговой сети)	Текущие	$\mathcal{E}_{3\text{пер.т}} < \mathcal{E}_{1\text{пер.т}}$	$- \Delta \mathcal{E}_{3\text{пер.т}}$
Масса перевозимого груза	Капитальные	$Q_{3\text{пер.т}} > Q_{1\text{пер.т}}$	$+ \Delta Q_{3\text{пер.т}}$
Экономия материалов контактной сети	Текущие	$M_{3\text{пер.т}} < M_{1\text{пер.т}}$	$- \Delta M_{3\text{пер.т}}$
Сокращение парка локомотивов	Капитальные	$L_{3\text{пер.т}} < L_{1\text{пер.т}}$	$- \Delta L_{3\text{пер.т}}$
Сокращение локомотивных бригад	Текущие	$B_{3\text{пер.т}} < B_{1\text{пер.т}}$	$- \Delta B_{3\text{пер.т}}$
Себестоимость перевозок	Текущие	$S_{3\text{пер.т}} < S_{1\text{пер.т}}$	$- \Delta S_{3\text{пер.т}}$
Наработка на отказ систем электроснабжения и электровозов	Капитальные	$n_{3\text{пер.т}} < n_{1\text{пер.т}}$	$- \Delta n_{3\text{пер.т}}$
Сокращение вагонного парка	Капитальные	$B_{3\text{пер.т}} < B_{1\text{пер.т}}$	$- \Delta B_{3\text{пер.т}}$
Затраты на маневровые работы	Текущие	$C_{3\text{пер.т}} < C_{1\text{пер.т}}$	$- \Delta C_{3\text{пер.т}}$
Рост парка тепловозов	Капитальные	$T_{3\text{пер.т}} > T_{1\text{пер.т}}$	$+ \Delta T_{3\text{пер.т}}$
Капитальные затраты в укрепление железнодорожного полотна	Капитальные	$K_{y3\text{пер.т}} > K_{y1\text{пер.т}}$	$+ \Delta K_{y3\text{пер.т}}$
Капитальные затраты для ввода в эксплуатацию новых железнодорожных путей для повышения провозной и пропускной способности	Капитальные	$K_{pc3\text{пер.т}} < K_{pc1\text{пер.т}}$	$- \Delta K_{pc3\text{пер.т}}$

Таблица 2

Оценка интегрального критерия эффективности системы электрической тяги трехфазного переменного тока по отношению к однофазному переменному току

$\mathcal{E}_{\text{инт}}$	Уровень оценки эффективности электрической тяги трехфазного переменного тока
$0 < \mathcal{E}_{\text{инт}} \leq 0,5$	Неудовлетворительный. Основные сроки и объемы выполнения работ в рамках управления энергоэффективностью не соблюдаются, основные показатели технологической эффективности свидетельствуют о недостаточном уровне организации электрической тяги трехфазного переменного тока
$0,5 < \mathcal{E}_{\text{инт}} < 1$	Удовлетворительный. Основные сроки и объемы выполнения работ в рамках управления энергоэффективностью соблюдаются, что свидетельствует о повышении уровня организации системы электрической тяги трехфазного переменного тока в соответствии с заданными значениями
$\mathcal{E}_{\text{инт}} = 1$	Достижнутый. Цели управления энергоэффективностью реализованы, выполнены инвестиционные проекты по энергосбережению и формированию системы электрической тяги трехфазного переменного тока

На третьем этапе для обоснования оценки интегрального критерия сравним приведенные затраты по обоим вариантам электроснабжения, которые с учетом показателей технико-экономических оценок (см. табл. 1) запишем следующим образом.

Для системы электротяги на однофазном переменном токе, млн руб.:

$$Z_{1\text{пер.т}} = E_n(K_{1\text{пер.т}} + L_{1\text{пер.т}} + B_{1\text{пер.т}} + T_{1\text{пер.т}} + K_{y1\text{пер.т}} + K_{pc1\text{пер.т}}) + \mathcal{E}_{1\text{пер.т}} + M_{1\text{пер.т}} + B_{1\text{пер.т}} + S_{1\text{пер.т}} + C_{1\text{пер.т}}. \quad (2)$$

Для системы электротяги трехфазного переменного тока, млн руб.:

$$Z_{3\text{пер.т}} = E_n(K_{3\text{пер.т}} + L_{3\text{пер.т}} + B_{3\text{пер.т}} + T_{3\text{пер.т}} + K_{y3\text{пер.т}} + K_{pc3\text{пер.т}}) + \mathcal{E}_{3\text{пер.т}} + M_{3\text{пер.т}} + B_{3\text{пер.т}} + S_{3\text{пер.т}} + C_{3\text{пер.т}}. \quad (3)$$

Тогда исходя из первоначальной гипотезы экономия приведенных затрат при внедрении электрической тяги трехфазного переменного тока с учетом внепротранспортного эффекта, который является существенным в этой экономии, составит



$$\begin{aligned}\Delta Z = & Z_{\text{пер.т}} - Z_{3\text{пер.т}} = \\ & = E_h (+\Delta K_{y3\text{пер.т}} + \Delta T_{3\text{пер.т}} - \Delta K_{3\text{пер.т}} - \\ & - \Delta \Pi_{3\text{пер.т}} - \Delta K_{pc3\text{пер.т}} - \Delta B_{3\text{пер.т}}) + \\ & + (\Delta C_{3\text{пер.т}} - \Delta \mathcal{E}_{3\text{пер.т}} - \Delta M_{3\text{пер.т}} - \Delta B_{3\text{пер.т}} - \\ & - \Delta S_{3\text{пер.т}}) + \Delta M_{ob} + \Delta \Pi_{tp} + \Delta \mathcal{E}_{yop} + \Delta \mathcal{E}_{зап} + \\ & + \Delta \mathcal{E}_{пот} + \Delta \Pi_{ндтр} + \Delta \mathcal{E}_{трасоц} - Y_{tp}. \quad (4)\end{aligned}$$

Общий внутртранспортный эффект при сравнении вариантов составит

$$\begin{aligned}\Delta \mathcal{E}_{bt} = & \Delta M_{ob} + \Delta \Pi_{tp} + \Delta \mathcal{E}_{yop} + \Delta \mathcal{E}_{зап} + \\ & + \Delta \mathcal{E}_{пот} + \Delta \Pi_{ндтр} + \Delta \mathcal{E}_{трасоц} - Y_{tp}, \quad (5)\end{aligned}$$

где ΔM_{ob} — экономия оборотных средств предприятий от увеличения участковой скорости системы электрической тяги трехфазного тока по отношению к однофазному переменному току; $\Delta \Pi_{tp}$ — снижение доли транспортных затрат в цене реализации продукции; $\Delta \mathcal{E}_{yop}$ — экономия производственных текущих

затрат, вызванных ускорением производства, оборота капитала и освоения природных ресурсов; $\Delta \mathcal{E}_{зап}$ — экономия расходов на хранение запасов материальных ресурсов; $\Delta \mathcal{E}_{пот}$ — экономия затрат, связанная с сокращением потерь грузов, внедрением специализированного подвижного состава, контейнерных и пакетных перевозок; $\Delta \Pi_{ндтр}$ — прирост прибыли собственников недвижимости за счет развития транспортной инфраструктуры; $\Delta \mathcal{E}_{трасоц}$ — социальный эффект, получаемый пассажирами от улучшения работы транспорта и качества обслуживания; Y_{tp} — расходы, связанные с устранением ущерба от наработки системы электрической тяги трехфазного тока по отношению к однофазному переменному току.

Таким образом, авторская гипотеза в отношении эффективности системы электротяги трехфазного переменного тока по сравнению с системой электротяги однофазного переменного тока подтверждена теоретически. Но для ее доказательства необходимо изменить формы статистической отчетности, которые бы позволили делать объективные технико-экономические расчеты при сравнении альтернативных систем электротяги. Однако для этого требуется принципиально изменить методологию учета затрат на железнодорожном транспорте.

Литература

- Курбасов А. С. Радикальное повышение производительности электровозов при использовании асинхронного тягового двигателя : материалы третьего международного симпозиума «Элтранс-2005», Санкт-Петербург, 5–17 ноября 2005 г. Санкт-Петербург : ПГУПС, 2007. С. 613–615.
- ООО «ТД «Электровозмаш». Переменный и постоянный ток. URL: <http://www.tdevm.ru/ru/articles/16/> (дата обращения: 20.04.2018).
- Historisches: Die Entwicklung der elektrischen Zugtraktion in Italien und Europa. Trifase-Storia. URL: <http://www.finescalemuc.de/trifasestoria.htm> (дата обращения: 20.04.2018).
- Аржанников Б. А. Трехфазная система электрической тяги переменного тока. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2019. 142 с.
- Котельников А. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. Москва : Интекст, 2002. 104 с.
- Мамошин Р. Р. Новые технологии электроснабжения железных дорог на переменном токе // Евразия Вести. Безопасность железнодорожного транспорта. 2007. IV. С. 11.
- Formigari V. A duecento all'ora agli albori del XX secolo. La linea sperimentale ad alta velocità Marienfelde — Zossen del 1902: un successo o un fallimento? // La Tecnica Professionale. Luglio—Agosto 2014. N. 7–8. 2–8.
- Drehstrom — Versuchsstrecke Grob — Lichterfelde — Zehlendorf. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Drehstrom-Versuchsstrecke_Grob (дата обращения: 20.04.2018).
- Königlich Preußische Militär-Eisenbahn. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Königlich_Preußische_Militär-Eisenbahn (дата обращения: 18.11.2019).
- Depraetere G. Drehstrom in Italien 1902–1976. Teil 1 // Der Lok-Vogel. Januar 2011. Nr. 64. 40–48.

References

- Kurbasov A. S. Significant increase of electric locomotives efficiency with the use of induction traction motor [Radikal'noe povyshenie proizvoditelnosti elektrovozov pri ispol'zovanii asinkhronnogo tyagovogo dvigatelya] : proceedings of the 3rd international symposium Eltrans'2005, St. Petersburg, November 5–17, 2005. St. Petersburg : PSTU, 2007. Pp. 613–615.
- Trading House «Electrovozmash» LLC. Alternating and direct current [000 «TD «Elektrovozmash»]. Peremennyy i postoyannyy tok]. URL: <http://www.tdevm.ru/ru/articles/16/> (access date: 20.04.2018).
- Historisches: Die Entwicklung der elektrischen Zugtraktion in Italien und Europa. Trifase-Storia. URL: <http://www.finescalemuc.de/trifasestoria.htm> (access date: 20.04.2018).
- Arzhannikov B. A. Three-phase alternating current system of electric traction [Trehfaznaya sistema elektricheskoy tyagi peremennogo toka]. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2019. 142 p.
- Kotel'nikov A. V. Electrification of railways. World trends and perspectives [Elektrifikatsiya zheleznykh dorog. Mirovye tendentsii i perspektivy]. Moscow : Intext, 2002. 104 p.
- Mamoshin R. R. New technologies of alternating current power supply of railways [Novye tekhnologii elektrosnabzheniya zheleznykh dorog na peremennom toke] // Eurasia News. Safety of railway transport. 2007. IV. P. 11.
- Formigari V. A duecento all'ora agli albori del XX secolo. La linea sperimentale ad alta velocità Marienfelde — Zossen del 1902: un successo o un fallimento? // La Tecnica Professionale. Luglio—Agosto 2014. N. 7–8. 2–8.
- Drehstrom — Versuchsstrecke Grob — Lichterfelde — Zehlendorf. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Drehstrom-Versuchsstrecke_Grob (access date: 20.04.2018).
- Königlich Preußische Militär-Eisenbahn. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Königlich_Preußische_Militär-Eisenbahn (access date: 18.11.2019).
- Depraetere G. Drehstrom in Italien 1902–1976. Teil 1 // Der Lok-Vogel. Januar 2011. Nr. 64. 40–48.

11. Depraetere G. Drehstrom in Italien 1902–1976. Teil 2 // Der Lok-Vogel. Februar 2011. Nr. 65. 38–43.
12. Depraetere G. Drehstrom in Italien 1902–1976. Teil 3 // Der Lok-Vogel. März 2011. Nr. 66. 56–62.
13. Depraetere G. Drehstrom in Italien 1902–1976. Teil 4 // Der Lok-Vogel. April 2011. Nr. 67. 41–49.
14. Орлов Ю. А., Янов В. П. Грузовой электровоз переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями // Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте : материалы пятого международного симпозиума «Элтранс-2009», Санкт-Петербург, 20–23 октября 2009 г. Санкт-Петербург : ПГУПС, 2009. С. 546–552.
15. Осипов В. Покорение Сибири // Гудок. 2017. 20 апреля. С. 3.
11. Depraetere G. Drehstrom in Italien 1902–1976. Teil 2 // Der Lok-Vogel. Februar 2011. Nr. 65. 38–43.
12. Depraetere G. Drehstrom in Italien 1902–1976. Teil 3 // Der Lok-Vogel. März 2011. Nr. 66. 56–62.
13. Depraetere G. Drehstrom in Italien 1902–1976. Teil 4 // Der Lok-Vogel. April 2011. Nr. 67. 41–49.
14. Orlov Yu. A., Yanov V. P. Freight direct current electric locomotive with induction traction motors [Gruzovoy elektrovoz peremennogo toka s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami] // Electrification, innovative technologies, high-speed traffic on railway transport : proceedings of the 5th international symposium Eltrans'2009, St. Petersburg, October 20–23, 2009. St. Petersburg : PSTU, 2009. Pp. 546–552.
15. Osipov V. Conquest of Siberia [Pokorenie Sibiri] // Gudok. 2017. April, 20. P. 3.

Объем статьи 0,64 авторских листа

УДК 629.4.016

Елена Анатольевна Сидорова, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Информатика и компьютерная графика» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,
Светлана Олеговна Подгорная, старший преподаватель кафедры «Информатика и компьютерная графика» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНОГО УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ПОЕЗДА ПРИ АНАЛИЗЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗАМИ

Elena Anatolyevna Sidorova, DSc in Engineering, Associate Professor, Head of Computer Science and Computer Graphics Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,
Svetlana Olegovna Podgornaya, Senior Lecturer, Computer Science and Computer Graphics Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Determination of basic specific train tractive resistance at analysis of power consumption of electric locomotives

Аннотация

В статье приведены рекомендации по определению основного удельного сопротивления движению поезда при выполнении анализа расхода электроэнергии на тягу поездов, играющего важную роль в повышении точности нормирования и прогнозирования энергозатрат, с учетом допущений, которые существенно упрощают необходимые расчеты.

Ключевые слова: перевозочный процесс, сопротивление движению поезда, электровоз, вагон, энергозатраты.

Summary

The paper presents recommendations on determination of basic specific train tractive resistance at analysis of power consumption on traction of trains that plays an important role in the increase of accuracy of standardization and prediction of power consumption with the consideration for assumptions that significantly simplify the necessary calculations.

Keywords: transportation process, train tractive resistance, electric locomotive, car, power consumption.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-80-84

Одна из составных частей оперативного и статистического анализа электропотребления на тягу поездов за отчетный период в структурных подразделениях ОАО «РЖД» разного уровня (от эксплуатационных локомотивных депо до сети железных дорог в целом) — определение величины изменения удельного расхода энергии (УРЭ) за счет изменения качественных показателей использования локомотивов, вычисляемой с помощью специальных коэффициентов влияния.

Расчет этих коэффициентов выполняют на основе обобщенных формул путем дифференцирования по соответствующему показателю уравнения тягово-энергетического паспорта локомотива, которое для электрической тяги имеет вид [1, 2]

$$b = \frac{10000}{Q \cdot \eta} \cdot \left(K_x \cdot K_{b_x} \cdot \frac{N_{KH}}{V_{tex}} + \frac{K_{TC} - K_x \cdot K_{b_x}}{367,2} \cdot (P+Q) \cdot (w_o + i) \right), \quad (1)$$

где Q — средняя масса поезда, т; η — номинальный коэффициент полезного действия локомотива; K_x — коэффициент использования мощности вспомогательного оборудования локомотива на холостом ходу ($K_x \in [0,5; 1,0]$); K_{b_x} — коэффициент, характеризующий относительный расход топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на холостом ходу; N_{KH} — номинальная касательная мощность локомотива, кВт; V_{tex} — средняя техническая скорость движения, км/ч; K_{TC} — коэффициент технического состояния локомотива; P — сцепной вес локомотива, т; w_o — основное удельное сопротивление движению поезда, Н/т, определяется согласно «Правилам тяговых расчетов для поездной работы» (ПТР) [3, 4]; i — дополнительное удельное сопротивление движению поезда от уклона, %.

Несмотря на то что уравнение (1) характеризует УРЭ в отдельно взятой поездке, в соответствии с нормативными требованиями ОАО «РЖД» [5] оно же применяется и при анализе энергопотребления на всех уровнях производственной иерархии — от эксплуатационного локомотивного депо до



сети железных дорог в целом. Особенности реализации такого подхода рассмотрены в настоящей статье.

Определение значений некоторых показателей выражения (1) на уровне структурного подразделения представляется проблематичным. Например, расчет коэффициента K_{TC} должен выполняться с учетом фактического и паспортного часовых расходов энергоносителя на режиме номинальной мощности, вычислить которые по статистическим данным массива поездок невозможно. Показатель K_x изменяется в указанном выше диапазоне, однако информация о том, какое именно его значение применять в конкретном случае, отсутствует. Значения Q и V_{tex} представляют собой средние величины и определяются по статистической отчетности о выполнении перевозочного процесса, но могут существенно отличаться на разных участках работы.

Показатели P , η , N_{KH} , K_b имеют большие диапазоны изменения для разных серий локомотивов, например, сцепной вес электровозов колеблется в пределах от 100 (серия Э5К) до 276 т (серия ВЛ85). По этой причине в уравнение (1) подставляются значения для осредненного локомотива. Они определяются с учетом долей перевозочной работы γA , выполняемой электровозами каждой серии относительно общей работы на электрической тяге в структурном подразделении, по формуле [2]

$$Z_{ocp} = \sum_s (Z \cdot \gamma A)_s, \quad (2)$$

где Z — значение рассматриваемого параметра для локомотивов s -й серии.

Эквивалентный уклон i для анализа энергозатрат на уровне структурного подразделения обычно принимают равным нулю, так как его величина не меняется в течение длительного времени, значительно превышающего анализируемый период.

Важнейшей составляющей уравнения (1) является основное удельное сопротивление движению поезда, которое определяется по формуле [6]

$$w_o = \frac{w'_o \cdot P + w''_o \cdot Q}{P + Q}, \quad (3)$$

где w'_o , w''_o — основное удельное сопротивление движению локомотивов и вагонов соответственно, Н/т.

Силы основного удельного сопротивления движению обусловлены трением в подшипниках подвижного состава, взаимодействием колесных пар с рельсами и сопротивлением от воздействия воздушной среды при отсутствии ветра. Основное удельное сопротивление движению локомотивов и вагонов определяется по полученным на основе обработки большого количества результатов испытаний эмпирическим выражениям, которые приведены в «Правилах тяговых расчетов для поездной работы» [3]. В 2016 г. распоряжением ОАО «РЖД» утверждена их новая редакция [4], в которой представлены формулы для расчета основного удельного сопротивления движению локомотивов в общем виде, а также уточненные формулы для конкретных серий подвижного состава. В некоторых случаях распоряжением ОАО «РЖД» [4] предписано применять данные и методы из ПТР, утвержденных в 1980 г. [3].

Расчет основного удельного сопротивления движению поезда w_o по формуле (3) вызывает определенные сложности, поскольку w'_o определяется по выражениям для различных серий локомотивов на бесстыковом и звеневом пути, w''_o — для груженых и порожних вагонов разных типов и осноти на бесстыковом и звеневом пути. Полный учет такой специфики приводит к громоздким формулам, необходимость и результативность применения которых при анализе энергозатрат на тягу поездов на уровне структурного подразделения сомнительна. В связи с этим возникла задача поиска определенных допущений, которые позволят существенно упростить расчеты w_o без снижения их точности.

Для определения w'_o в общем случае в ПТР приведены следующие формулы:

на бесстыковом пути

$$w'_{o \text{ бп}} = 18,6 + 0,08 \cdot V_{tex} + 0,0024 \cdot V_{tex}^2; \quad (4)$$

на звеневом пути

$$w'_{o \text{ зп}} = 18,6 + 0,1 \cdot V_{tex} + 0,0029 \cdot V_{tex}^2. \quad (5)$$

Учитывая, что в отчетности ОАО «РЖД» присутствует только показатель доли бесстыкового пути $M_{бп}$, долю звеневого пути представим как $(1 - M_{бп})$. В соответствии с этим выражение для определения основного удельного сопротивления движению локомотивов на всем пути следования с учетом долей бесстыкового и звеневого пути можно записать следующим образом:

$$w'_o = w'_{o \text{ бп}} \cdot M_{бп} + w'_{o \text{ зп}} \cdot (1 - M_{бп}). \quad (6)$$

При подстановке уравнений (4) и (5) в выражение (6) обобщенная формула для расчета основного удельного сопротивления движению локомотивов примет вид

$$w'_o = 18,6 + A_{\text{л}} \cdot V_{tex} + B_{\text{л}} \cdot V_{tex}^2, \quad (7)$$

где $A_{\text{л}}$, $B_{\text{л}}$ — вспомогательные коэффициенты, вычисляемые по выражениям:

$$A_{\text{л}} = 0,02 \cdot (5 - M_{бп}); B_{\text{л}} = 0,0005 \cdot (5,8 - M_{бп}). \quad (8)$$

С целью выявления степени влияния структуры эксплуатируемого парка электровозов на величину основного удельного сопротивления движению выполним расчет w'_o с учетом долей работы локомотивов разных серий. Для этого представим в выражение (6) показатели $w'_{o \text{ бп}}$ и $w'_{o \text{ зп}}$ для осредненного электровоза, определив их по формуле (2), в результате чего получим:

$$w'_o = \sum_s (w'_{o \text{ бп}} \cdot \gamma A)_s \cdot M_{бп} + \sum_s (w'_{o \text{ зп}} \cdot \gamma A)_s \cdot (1 - M_{бп}). \quad (9)$$

Для выполнения количественных расчетов по формуле (9) используем фактические данные о перевозочном процессе в грузовом движении на электрической тяге по железной дороге N за август 2017 г. (табл. 1).



Таблица 1

Показатели перевозочного процесса по железной дороге N

$V_{\text{тех}}$, км/ч	P , т	η	N_{KH} , кВт	K_{b_x}	Q , т	q_0 , т/ось	K_x	K_{TC}	$M_{\text{бп}}$	$M_{\text{пв}}$
56,1	191	0,876	5560	0,0162	4312,7	15,5	0,9	1,0	0,9	0,383

Перевозочную работу на рассматриваемой железной дороге выполняют электровозы серий 2ЭС6 (28,6 % от общей работы на электрической тяге), ЭП2К (3,5 %) и ЭП1 (0,1 %), для которых в ПТР приведены уточненные формулы для расчета w'_o (табл. 2). Для электровозов остальных серий (ВЛ80С, ВЛ10, 2ЭС10 и др.), выполняющих почти 70 % от общей работы, уточненные выражения для определения w'_o отсутствуют, следовательно, в этом случае необходимо применять общую формулу (7). Анализ результатов расчетов (табл. 3), выполненных с учетом приведенных в табл. 2 формул, показал, что значения основного удельного сопротивления движению электровозов, вычисленные по обобщенной формуле (30,911 Н/т) и с учетом структуры парка локомотивов по сериям (26,287 Н/т), различаются весьма существенно (на 17,6 %).

В отчетности ОАО «РЖД» присутствует показатель доли порожних вагонов $M_{\text{пв}}$, поэтому долю груженых вагонов представим как $(1 - M_{\text{пв}})$. Тогда формулы для расчета основного удельного сопротивления движению порожних и груженых вагонов будут выглядеть следующим образом:

на бесстыковом пути

$$w''_{o \text{ бп}} = w''_{o \text{ бп пв}} \cdot M_{\text{пв}} + w''_{o \text{ бп гв}} \cdot (1 - M_{\text{пв}}); \quad (10)$$

на звеневом пути

$$w''_{o \text{ зп}} = w''_{o \text{ зп пв}} \cdot M_{\text{пв}} + w''_{o \text{ зп гв}} \cdot (1 - M_{\text{пв}}), \quad (11)$$

где $w''_{o \text{ бп гв}}$, $w''_{o \text{ бп пв}}$ — соответственно основное удельное сопротивление движению груженых и порожних вагонов на бесстыковом пути, Н/т; $w''_{o \text{ зп гв}}$, $w''_{o \text{ зп пв}}$ — соответственно основное удельное сопротивление движению груженых и порожних вагонов на звеневом пути, Н/т.

Уравнение для расчета основного удельного сопротивления движению вагонов на всем пути следования примет вид

Таблица 2

Формулы для расчета основного удельного сопротивления движению электровозов

Серия электровоза	Тип пути	Формулы для расчета w'_o
2ЭС6	Бесстыковой	$w'_o = 6,7 + 0,022 \cdot V_{\text{тех}} + 0,0028 \cdot V_{\text{тех}}^2$
	Звеневовой	$w'_o = 6,7 + 0,016 \cdot V_{\text{тех}} + 0,0034 \cdot V_{\text{тех}}^2$
ЭП2К	Бесстыковой	$w'_o = 6,8 + 0,0098 \cdot V_{\text{тех}} + 0,0022 \cdot V_{\text{тех}}^2$
	Звеневовой	$w'_o = 6,8 + 0,029 \cdot V_{\text{тех}} + 0,0025 \cdot V_{\text{тех}}^2$
ЭП1	Бесстыковой	$w'_o = 4,8 + 0,025 \cdot V_{\text{тех}} + 0,0033 \cdot V_{\text{тех}}^2$
	Звеневовой	$w'_o = 4,8 + 0,012 \cdot V_{\text{тех}} + 0,004 \cdot V_{\text{тех}}^2$
Прочие	Бесстыковой	$w'_o = 18,6 + 0,08 \cdot V_{\text{тех}} + 0,0024 \cdot V_{\text{тех}}^2$
	Звеневовой	$w'_o = 18,6 + 0,1 \cdot V_{\text{тех}} + 0,0029 \cdot V_{\text{тех}}^2$

Таблица 3

Основное удельное сопротивление движению электровозов разных серий на бесстыковом и звеневом пути на железной дороге N

Серия электровоза	Расчетное значение w'_o , Н/т	Доля работы γA	Расчетное значение w'_o с учетом доли γA , Н/т
2ЭС6	16,801	0,286	4,805
ЭП2К	14,476	0,035	0,507
ЭП1	16,736	0,001	0,017
Прочие	30,911	0,678	20,958
Итого	-	1,000	26,287

С учетом долей вагонов разных типов и осности γA выражение (12) примет вид

$$w''_o = \left(\sum_j (w''_{o \text{ бп гв}} \cdot \gamma A)_j \cdot (1 - M_{\text{пв}}) + \sum_j (w''_{o \text{ бп пв}} \cdot \gamma A)_j \cdot M_{\text{пв}} \right) \cdot M_{\text{бп}} + \left(\sum_j (w''_{o \text{ зп гв}} \cdot \gamma A)_j \cdot (1 - M_{\text{пв}}) + \sum_j (w''_{o \text{ зп пв}} \cdot \gamma A)_j \cdot M_{\text{пв}} \right) \cdot (1 - M_{\text{бп}}). \quad (13)$$



Таблица 4

Основное удельное сопротивление движению грузовых вагонов

Основность и тип вагона	Формулы для расчета w''_o	Расчетное значение w''_o , Н/т
Бесстыковой путь		
<i>Груженые вагоны ($q_o > 6 \text{ т}$)</i>		
Четырехосный полувагон	$w''_o = 5,2 + \frac{34,2 + 0,732 \cdot V_{\text{tex}} + 0,022 \cdot V_{\text{tex}}^2}{q_o}$	12,081
Шестиосный вагон	$w''_o = 6,9 + \frac{78,5 + 0,78 \cdot V_{\text{tex}} + 0,02 \cdot V_{\text{tex}}^2}{q_o}$	15,719
Восьмиосный вагон	$w''_o = 6,9 + \frac{58,9 + 0,26 \cdot V_{\text{tex}} + 0,017 \cdot V_{\text{tex}}^2}{q_o}$	12,947
<i>Порожние вагоны ($q_o \leq 6 \text{ т}$)</i>		
Четырехосный полувагон	$w''_o = 5,2 + \frac{34,2 + 0,732 \cdot V_{\text{tex}} + 0,022 \cdot V_{\text{tex}}^2}{q_o}$	31,473
Шестиосный вагон	$w''_o = 9,8 + 0,41 \cdot V_{\text{tex}} + 0,0016 \cdot V_{\text{tex}}^2$	37,837
Восьмиосный вагон	$w''_o = 6,9 + \frac{58,9 + 0,26 \cdot V_{\text{tex}} + 0,017 \cdot V_{\text{tex}}^2}{q_o}$	29,989
Звеневьевой путь		
<i>Груженые вагоны ($q_o > 6 \text{ т}$)</i>		
Четырехосный полувагон	$w''_o = 5,2 + \frac{35,4 + 0,785 \cdot V_{\text{tex}} + 0,027 \cdot V_{\text{tex}}^2}{q_o}$	13,029
Шестиосный вагон	$w''_o = 6,9 + \frac{78,5 + 0,98 \cdot V_{\text{tex}} + 0,024 \cdot V_{\text{tex}}^2}{q_o}$	16,853
Восьмиосный вагон	$w''_o = 6,9 + \frac{58,9 + 0,37 \cdot V_{\text{tex}} + 0,021 \cdot V_{\text{tex}}^2}{q_o}$	13,840
<i>Порожние вагоны ($q_o \leq 6 \text{ т}$)</i>		
Четырехосный полувагон	$w''_o = 5,2 + \frac{35,4 + 0,785 \cdot V_{\text{tex}} + 0,027 \cdot V_{\text{tex}}^2}{q_o}$	35,093
Шестиосный вагон	$w''_o = 9,81 + 0,43 \cdot V_{\text{tex}} + 0,002 \cdot V_{\text{tex}}^2$	40,227
Восьмиосный вагон	$w''_o = 6,9 + \frac{58,9 + 0,37 \cdot V_{\text{tex}} + 0,021 \cdot V_{\text{tex}}^2}{q_o}$	33,400

Таблица 5

Расчетные значения основного удельного сопротивления движению грузовых вагонов

Основность и тип вагона	Расчетное значение w''_o , Н/т	Доля вагонов γA	Расчетное значение w''_o с учетом доли вагонов γA , Н/т
Четырехосный полувагон	19,706	0,9981	19,668
Шестиосный вагон	24,352	0,0004	0,010
Восьмиосный вагон	19,660	0,0015	0,029
Итого	—	1,0000	19,707

Значения основного удельного сопротивления движению порожних и груженых вагонов на бесстыковом и звеневьевом пути с учетом долей вагонов разных типов и осности, рассчитанные по формуле (13), представлены в табл. 5.

Данные табл. 5 свидетельствуют о том, что значения w''_o вагонов разных типов и осности в некоторых случаях отличаются довольно существенно. Однако, поскольку доля шести- и восьмиосных вагонов очень мала, общее удельное сопротивление движению грузовых вагонов с учетом долей вагонов каждого типа (19,707 Н/т) отличается от случая, предполагающего, что перевозка грузов осуществляется только четырехосными полуавтоматами (19,706 Н/т), всего на 0,01 %.

При допущении, что в составе поезда эксплуатируются только четырехосные полуавтоматы, выражение для определения основного удельного сопротивления движению грузовых вагонов примет вид

$$w''_o = A_{\text{гр}} + B_{\text{гр}} \cdot V_{\text{tex}} + C_{\text{гр}} \cdot V_{\text{tex}}^2, \quad (14)$$

где $A_{\text{гр}}$, $B_{\text{гр}}$, $C_{\text{гр}}$ — вспомогательные коэффициенты, определяемые по формулам:

$$\begin{aligned} A_{\text{гр}} &= 5,2 + \frac{1,2 \cdot (29,5 - M_{6\pi})}{q_o}; \\ B_{\text{гр}} &= \frac{0,053 \cdot (14,81 - M_{6\pi})}{q_o}; \\ C_{\text{гр}} &= \frac{0,005 \cdot (5,4 - M_{6\pi})}{q_o}. \end{aligned} \quad (15)$$

С учетом выражений (9) и (13) удельные энергозатраты, рассчитанные по формуле (1), равны $b = 69,64$ кВт·ч/10 тыс. т·км брутто, при применении общего выражения (7) для всех серий локомотивов и с учетом формулы (14) $b = 69,70$ кВт·ч/10 тыс. т·км брутто для четырехосных полуавтоматов. Расхождение этих значений составляет 0,09 %. Фактическое значение УРЭ составляет 69,68 кВт·ч/10 тыс. т·км брутто, т.е. практически совпадает с расчетными.

Подобные расчеты выполнены по статистическим данным пяти железных дорог России. Расхождения полученных результатов при применении допущений и без них не превышают 2 %. Следовательно, можно сделать вывод о том, что на уров-



не дороги или сети железных дорог при анализе энергозатрат для определения основного удельного сопротивления движению поезда достаточно использовать обобщенные выражения (7) и (14). Рассмотренные выше допущения практичес-

ски не влияют на погрешность расчетов, однако существенно упрощают выполнение анализа расхода ТЭР, играющего важную роль в повышении точности нормирования и прогнозирования энергозатрат на тягу поездов.

Литература

1. Методика анализа результатов расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов № ЦТД-26 : утв. МПС России 20.06.1997 г.
2. Сидорова Е. А., Подгорная С. О. Влияние показателей использования локомотивов на расход энергоресурсов в грузовом движении // Транспорт Урала. 2016. № 1 (48). С. 41–45. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-41-45. ISSN 1815–9400.
3. Правила тяговых расчетов для поездной работы : утв. МПС СССР 15.08.1980 г.
4. Правила тяговых расчетов для поездной работы : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 г. № 867п.
5. Методика анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 26.12.2014 г. № 512.
6. Теория электрической тяги : учебник / С. И. Осипов, С. С. Осипов, В. П. Феоктистов ; под ред. С. И. Осипова. Москва : Маршрут, 2006. 436 с.

References

1. A method for analysis of fuel and energy consumption for train traction No. TsTD-26 [Metodika analiza rezul'tatov raskhoda toplivno-energeticheskikh resursov na tyagu poezdov № TsTD-26] : approved by the Russian Ministry of Transport 20.06.1997.
2. Sidorova E. A., Podgornaya S. O. Effect of locomotive utilization rate on energy consumption in freight traffic [Vliyanie pokazateley ispol'zovaniya lokomotivov na raskhod energoresursov v gruzovom dvizhenii] // Transport of the Urals. 2016. No. 1 (48). Pp. 41–45. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-41-45. ISSN 1815–9400.
3. Traction calculation rules for train operation [Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnnoy raboty] : approved by the Ministry of Transport of the USSR 15.08.1980.
4. Traction calculation rules for train operation [Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnnoy raboty] : approved by the Order of the JSC Russian Railways dated 12.05.2016 No. 867r.
5. A method for analysis and forecasting of energy resources consumption for train traction [Metodika analiza i prognozirovaniya raskhoda TER na tyagu poezdov] : approved by the Order of the JSC Russian Railways dated 26.12.2014 No. 512.
6. Theory of electric traction [Teoriya elektricheskoy tyagi] : textbook / S. I. Osipov, S. S. Osipov, V. P. Feoktistov ; ed. by S.I. Osipov. Moscow : Rout, 2006. 436 p.

Объем статьи 0,4 авторских листа

УДК 621.331:621.311

Александр Алексеевич Бакланов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Станислав Геннадьевич Истомин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ЭД4М

Alexander Alexeevich Baklanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Stanislav Gennadyevich Istomin, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Efficiency of using electric power for traction of ED4M electric multiple units

Аннотация

В статье представлены результаты поездок 6- и 8-вагонного электропоезда ЭД4М и дана оценка влияния различных факторов на расход электроэнергии. В частности, рассмотрены режимы пуска и торможения на примере кривых скорости движения от времени, а также кривых тока тяговых двигателей от времени при разных пусковых ускорениях. На основе детального анализа установлено, что при неизменном времени хода за счет большего пускового ускорения и меньшей скорости начала торможения расход энергии уменьшается, а при меньшем пусковом ускорении и большей скорости начала торможения — увеличивается. Помимо этого, в статье рассмотрено влияние и таких факторов, как населенность, длина поезда, метеорологические условия, расхождение характеристик двигательно-колесных блоков моторных вагонов.

Ключевые слова: электропоезд, удельный расход электроэнергии, режимы пуска и торможения, населенность электропоездов, длина поезда, метеорологические условия, расхождение характеристик двигательно-колесных блоков моторных вагонов.

Summary

The paper presents results of 6-car and 8-car ED4M electric multiple unit rides and assessments of various factors influence on power consumption. In particular, the paper considers modes of starting and braking on example of speed-time curves and traction motor current-time curves at different starting accelerations. A detailed analysis showed at unaltered running time due to higher starting acceleration and lower starting braking speed the power consumption decreases and at lower starting acceleration and higher starting braking speed it increases. Besides, the paper considers an influence of such factors as density of population, train length, weather conditions and divergence of characteristics of motor-wheel units of motor cars.

Keywords: electric multiple unit, specific power consumption, modes of starting and braking, density of electric multiple unit population, train length, weather conditions, divergence of characteristics of motor-wheel units of motor cars.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-85-89

ОАО «РЖД» — один из крупнейших потребителей энергоресурсов, на долю которого приходится около 4,4 % всей вырабатываемой в России электроэнергии, из них 85 % расходуется на тягу поездов. Соответственно одна из приоритетных задач энергетической стратегии холдинга ОАО «РЖД» — значительное повышение показателей энергетической эффективности тяги поездов. Так, в целом по ОАО «РЖД» прогнозируемое снижение удельного расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов должно составить к 2030 г. от 8,0 до 9,0 % от уровня 2015 г., что может быть достигнуто, в частности, за счет разработки технических и технологических решений по повышению энергетической эффективности моторвагонного подвижного состава [1].

В статье анализируются результаты поездок 6- и 8-вагонного электропоезда ЭД4М и оценивается влияние различных факторов на расход его электроэнергии.

Расход электроэнергии пригородных электропоездов зависит от многих факторов: массы и населенности вагонов, профиля и плана пути обслуживаемых участков, скорости движения и ее колебаний, режимов движения и их сочетания, метеорологических условий, теплотехнического состояния вагонов, квалификации локомотивных бригад, технического состояния подвижного состава, пути, устройств электроснабжения, сигнализации и связи и т.п. [2–4].

Электропоезд ЭД4М в основном варианте, как и электропоезда других серий, состоит из 5 секций, при этом каждая секция комплектуется из моторного и прицепного вагонов. При снижении пассажиропотока количество секций в электропоезде уменьшается, при этом его тягово-энергетические показатели изменяются [5].

Анализ двух поездок электропоезда № 6483 ЭД4М-0309-0196-0244 на участке Омск — Исилькуль (табл. 1 и 2) показал следующее.

В поездке № 1 (3-секционный 6-вагонный ЭД4М-0309-0196) масса и мощность электропоезда были меньше на 25 % по сравнению с поездкой № 2 (4-секционный 8-вагонный ЭД4М-0309-0196-0244), однако общий расход электроэнергии оказался меньше всего на 8,7 %, в том числе расход на тягу меньше на 9,8 %, расход на отопление — на 3,5 %, расход на вспомогательные нужды — на 36 %, а удельный расход электроэнергии — больше на 21,7 %. Такая не-пропорциональная разница между расходом электроэнергии, а также массой и мощностью электропоезда обусловлена различными причинами.

Во-первых, время хода и средние скорости в обеих поездках несколько отличались, следовательно, режимы движения электропоезда и их сочетание были разными, в результате — разный удельный расход электроэнергии на тягу. В поездке № 1 средняя скорость выше, чем в поездке № 2 (соответственно 56,5 и 56,1 км/ч), и в определенной степени по этой причине удельный расход электроэнергии на тягу тоже выше (319,5 и 265,9 кВт·ч/10⁴ т·км соответственно).

Во-вторых, метеорологические условия в поездке № 1, по всей вероятности, были менее благоприятные, чем в поездке № 2. Из-за этого расход электроэнергии на отопление (571,75 кВт·ч) в поездке № 1 с 6-вагонным электропоездом оказался всего на 3,5 % меньше, чем в поездке № 2 с 8-вагонным электропоездом (592,5 кВт·ч).

Следовательно, сравниваемые поездки происходили в разных условиях, и по их результатам делать достоверные выводы не представляется возможным.

Как известно, удельный расход электроэнергии на тягу поездов (кВт·ч/10⁴ т·км) рассчитывают по формуле

$$a_3 = \frac{A_3 \cdot 10^4}{mL},$$

где A_3 — полный расход электроэнергии, кВт·ч; m — масса поезда, т; L — длина участка, км.

Из этой формулы видно, что удельный расход электроэнергии прямо пропорционален полному расходу электроэнергии и обратно пропорционален транспортной

Таблица 1

Результаты поездки № 1 электропоезда ЭД4М, состоящего из 3 секций и 6 вагонов, на участке Омск — Исилькуль (пробег 137,502 км)

Показатель	Бортовой номер секции			Итого
	0309-04	0309-10	0196-06	
Общий расход электроэнергии, кВт·ч	748,00	744,00	774,50	2266,50
В том числе, кВт·ч:				
на тягу	546,50	579,00	543,25	1668,75
на отопление	196,25	153,25	222,25	571,75
на вспомогательные нужды	5,25	11,50	9,00	25,75
Энергия рекуперации	0,00	0,00	0,00	0,00
Удельный расход на 10000 т·км, кВт·ч	442,270	439,905	457,939	446,705

Таблица 2

Результаты поездки № 2 электропоезда ЭД4М, состоящего из 4 секций и 8 вагонов, на участке Омск — Исилькуль (пробег 137,498 км)

Показатель	Бортовой номер секции				Итого
	0309-04	0196-06	0309-10	0244-10	
Общий расход электроэнергии, кВт·ч	629,50	636,75	618,50	598,25	2483,00
В том числе, кВт·ч:					
на тягу	482,50	464,00	466,00	438,00	1850,50
на отопление	140,00	158,25	140,75	153,50	592,50
на вспомогательные нужды	7,25	14,50	11,75	6,75	40,25
Энергия рекуперации	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Удельный расход на 10000 т·км, кВт·ч	372,215	376,502	365,711	353,738	367,042

работе, т.е. произведению массы поезда на длину участка. При каком-либо изменении массы поезда, т.е. транспортной работы, полный расход электроэнергии обычно меняется в меньшей степени, поэтому при прочих равных условиях и увеличении массы удельный расход электроэнергии, как правило, снижается, а при уменьшении массы — возрастает.

Ранее выполненные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что энергозатраты на тягу поездов подчиняются закономерностям, представленным на рис. 1. Из этих зависимостей следует, что при возрастании массы поезда m полный расход электроэнергии A_3 увеличивается прямо пропорционально и меняется по линейному закону, а удельный расход электроэнергии уменьшается обратно пропорционально и меняется по нелинейному закону. Такие зависимости характерны прежде всего для локомотивной тяги.

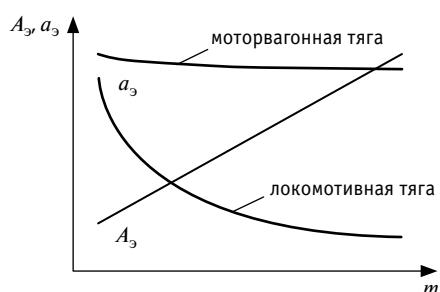


Рис. 1. Зависимости полного A_3 и удельного a_3 расхода электроэнергии на тягу от массы поезда m

В моторвагонной тяге подобные закономерности проявляются в меньшей степени, однако при изменении составности и массы электропоезда полный расход электроэнергии меняется прямо пропорционально по линейному закону. Удельный расход электроэнергии в значительно меньшей степени зависит от составности и массы электропоезда, но, тем

не менее, он несколько снижается при увеличении и возрастает при уменьшении массы и количества вагонов.

Расход электроэнергии пригородных электропоездов существенно зависит от режимов движения, их сочетания и параметров: средней скорости, ускорения, скорости окончания пуска в режиме тяги, скорости начала торможения и т.п. Поскольку большое влияние на расход электроэнергии оказывают режимы пуска и торможения электропоезда, рассмотрим их подробнее на примере кривых скорости движения от времени $v(t)$ и тока тяговых двигателей от времени $I(t)$ при разных пусковых ускорениях a_{n1} , представленных на рис. 2 [1–3]. Так как для сравнения расхода энергии длины перегонов и средние скорости должны быть одинаковыми, то площади, ограничиваемые кривыми движения и пропорциональные длине перегона, одинаковы; общее время хода в обоих случаях также одинаково.

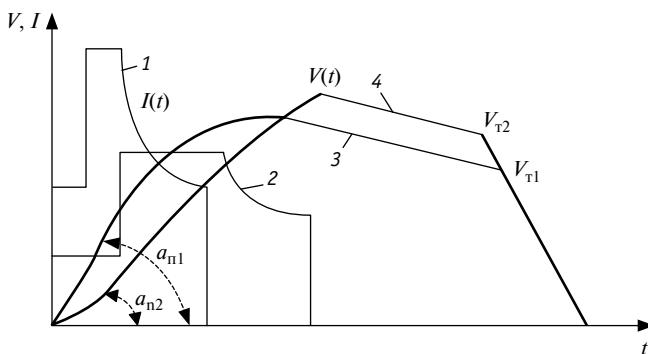


Рис. 2. Кривые движения электропоезда при разных пусковых ускорениях:

1 и 3 — соответственно кривые зависимости тока $I(t)$ и скорости $v(t)$ от времени при большем ускорении $(dv/dt)_1 = a_{n1}$; 2 и 4 — то же при меньшем ускорении $(dv/dt)_2 = a_{n2}$

Ускорение при пуске a_n и скорость v_n в момент выхода на естественную, т.е. безреостатную, характеристику определяются пусковым током I : чем больше I и a_n , тем меньше скорость v_n . Следовательно, с повышением ускорения уменьшаются потери в пусковых реостатах.

Экономия энергии при увеличении ускорения не ограничивается уменьшением пусковых потерь. Как видно из рис. 2, благодаря более быстрому разгону при большом ускорении оказывается возможным снизить скорость в момент начала торможения с v_{T2} до v_{T1} . Поэтому с повышением пускового ускорения уменьшаются потери в тормозах при остановке поезда, пропорциональные квадрату скорости начала торможения. Таким образом, при неизменном времени хода за счет большего пускового ускорения и меньшей скорости начала торможения расход энергии снижается, и наоборот при меньшем пусковом ускорении и большей скорости начала торможения расход энергии увеличивается.

Отсюда следует, что при сокращении числа вагонов электропоезда и неизменном количестве пассажиров масса одного вагона увеличивается. За счет этого уменьшается пусковое ускорение, при одинаковом времени хода по перегону увеличиваются время разгона и скорость начала торможения, а в результате возрастает расход энергии.

Для количественной оценки этого примера на рис. 3 приведены рассчитанные кривые движения порожнего и полностью загруженного электропоезда ЭД4М на равнинном профиле пути при одинаковом времени хода на перегоне, равном 5,14 мин.

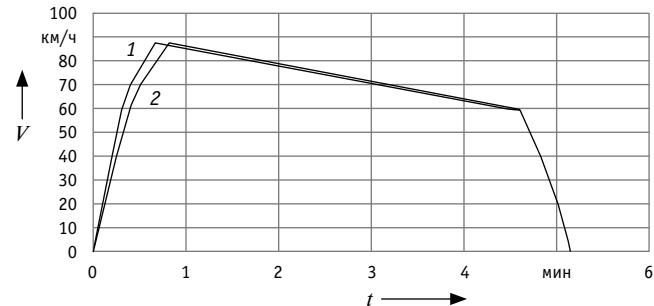


Рис. 3. Кривые движения порожнего (1) и груженого (2) электропоезда ЭД4М при одинаковом перегонном времени хода

Порожний электропоезд (кривая 1) разгоняется в режиме тяги до скорости 87,1 км/ч за время 39,6 с = 0,66 мин, далее следует выбег со снижением скорости до 59,2 км/ч, и затем происходит пневматическое торможение до остановки, удельный расход полезной энергии (механической работы) тяговыми двигателями составляет 161,4 кВт·ч/ 10^4 т·км. Груженый электропоезд (кривая 2) разгоняется в режиме тяги до скорости 87,1 км/ч за время 49,8 с = 0,83 мин, т.е. с меньшим ускорением, далее следует выбег со снижением скорости до 60,0 км/ч, и затем происходит пневматическое торможение до остановки, удельный расход полезной энергии (механической работы) тяговыми двигателями составляет 164,6 кВт·ч/ 10^4 т·км. Таким образом, при полной населенности электропоезда пусковое ускорение уменьшается, время разгона в режиме тяги увеличивается на 25,8 %, а удельный расход энергии возрастает на 2,0 %.

Большое влияние на расход энергии оказывает скорость в момент начала торможения. На рис. 4 изображены кривые $v(t)$ на одном и том же перегоне при двух различных скоростях в момент начала торможения. Сравнение этих кривых показывает, что при увеличении скорости с v_{T1} до v_{T2} общее время движения по перегону снижается с T_1 до T_2 , но зато увеличивается с t_{f1} до t_{f2} время потребления тока I , т.е. расход энергии. В результате из-за большей скорости начала торможения потери энергии в тормозах возрастают.

Для количественной оценки этого примера на рис. 5 приведены рассчитанные кривые движения электропоезда ЭД4М на равнинном профиле пути при одинаковом пусковом ускорении и разных скоростях в момент начала торможения, при этом на рис. 5а кривые скорости движения представлены в функции времени $V(t)$, а на рис. 5б — в функции пути $I(t)$.

Расчеты показывают, что в первом случае (кривая 1) электропоезд ЭД4М разгоняется в режиме тяги до скорости 87,1 км/ч, далее следует выбег со снижением скорости до 60 км/ч, и затем происходит пневматическое торможение до остановки. Время хода электропоезда на перегоне длиной 5,62 км составляет 5,14 мин, средняя скорость — 65,6 км/ч, удельный расход полезной энергии (механической работы) тяговыми двигателями — 164,6 кВт·ч/ 10^4 т·км.

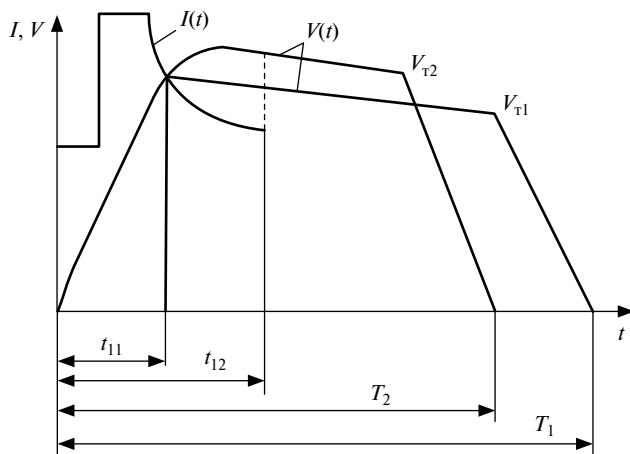


Рис. 4. Кривые движения электропоезда при одинаковом пусковом ускорении и разных скоростях в момент начала торможения

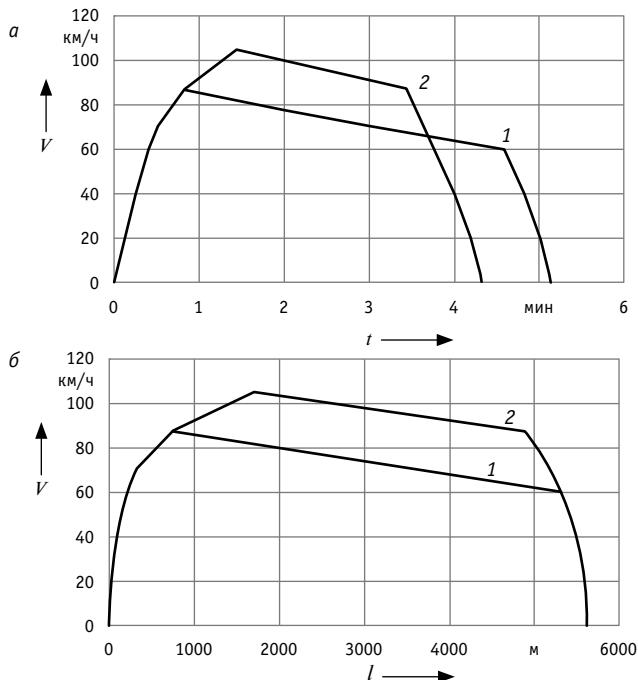


Рис. 5. Кривые движения электропоезда ЭД4М при одинаковом пусковом ускорении (а) и разных скоростях (б) в момент начала торможения

Во втором случае (кривая 2) электропоезд ЭД4М разгоняется в режиме тяги до скорости 104,5 км/ч, далее следует выбег со снижением скорости до 87,4 км/ч, и затем происходит пневматическое торможение до остановки. Время хода электропоезда на перегоне длиной 5,62 км составляет 4,33 мин, средняя скорость — 77,9 км/ч, удельный расход полезной энергии (механической работы) тяговыми двигателями — 252,9 кВт·ч/ 10^4 т·км.

Таким образом, во втором случае время хода по перегону сокращается на 15,8 %, однако увеличиваются скорость разго-

на и средняя скорость на перегоне, продолжительность режима тяги и потребления энергии, увеличение удельного расхода энергии составляет 53,6 %. Следовательно, удельные энергозатраты возрастают в большей степени, чем снижается время хода. Такой вариант, несмотря на его неэкономичность, обычно используют для нагона опоздания электропоезда. Расчеты показывают, что даже при небольшом сокращении перегонного времени хода расход энергии на тягу возрастает в значительно большей степени. С другой стороны, при небольшом увеличении перегонного времени хода расход энергии на тягу существенно снижается.

Выполненные расчеты в определенной степени подтверждают данные табл. 1 и 2, из которых видно, что в поездке № 2 (8 вагонов) время хода несколько больше, а средняя скорость меньше, чем в поездке № 1 (6 вагонов). Разумеется, это повлияло на снижение удельного расхода электроэнергии 8-вагонного электропоезда в поездке № 2 по сравнению с 6-вагонным в поездке № 1.

На расход электроэнергии существенно влияет населенность электропоезда. Расчеты показывают, что при прочих равных условиях полный расход электроэнергии с максимальным количеством пассажиров может быть на 20–30 % выше, чем у порожнего электропоезда. Как известно, фактический удельный расход электроэнергии рассчитывается на основании полного расхода, измеренного счетчиками электроэнергии, и произведенной транспортной работы. Если по фактическому полному расходу электроэнергии рассчитать удельный расход в предположении максимальной загрузки электропоезда пассажирами и принять его за единицу, то при том же полном расходе электроэнергии и половинной загрузке электропоезда удельный расход будет в 1,10–1,15 раза выше, а при нулевой загрузке электропоезда — в 1,20–1,25 раза выше. Следовательно, если в расчетах всегда принимать постоянную загрузку вагонов, равную, например, средней загрузке, то при увеличении количества вагонов расчетный удельный расход электроэнергии, как правило, получается заниженный, а при их сокращении — завышенный.

Выполненные исследования показывают, что при увеличении длины поезда под ним происходит сглаживание профиля и плана пути, в результате уменьшается составляющая расхода энергии на преодоление профиля и плана пути и снижается удельный расход электроэнергии на тягу. Поэтому при прочих равных условиях длинный поезд имеет меньший удельный расход электроэнергии на тягу, и наоборот короткий поезд имеет больший удельный расход электроэнергии на тягу. Это является одной из причин большего удельного расхода электроэнергии на тягу электропоезда в 6-вагонном варианте по сравнению с 8-вагонным вариантом.

Большое влияние на расход электроэнергии поезда оказывают метеорологические условия, особенно ветер и температура воздуха. При встречном ветре расход электроэнергии возрастает из-за увеличения основного сопротивления движению, причем чем больше скорость ветра, тем выше расход энергии на тягу. При низкой температуре воздуха возрастают основное сопротивление движению и соответствующая составляющая расхода энергии, а также увеличивается расход электроэнергии на отопление вагонов [6, 7]. В основном более

низкой температурой воздуха объясняется то, что расход электроэнергии на отопление в поездке № 1 оказался меньше всего на 3,5 %, чем в поездке № 2. Во многом из-за этого удельный расход электроэнергии в поездке № 1 оказался выше, чем в поездке № 2.

Расход электроэнергии электропоезда также зависит от расходления характеристик двигательно-колесных блоков моторных вагонов, настройки и регулировки оборудования секций. Влияние этих факторов на удельный расход электроэнергии, как правило, тем больше, чем меньше количество секций в составе.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований установлено, что у электропоезда ЭД4М в 6-вагонном исполнении по сравнению с 8-вагонным исполнением масса и мощность меньше на 25 %, общий расход электроэнергии меньше всего на 8,7 %, в том числе на тягу — на 9,8 %, на отопление — на 3,5 %, на вспомога-

тельные нужды — на 36 %, но в то же время удельный расход электроэнергии больше на 21,7 %. Такая непропорциональная разница между расходом электроэнергии, массой и мощностью обусловлена разными режимами движения электропоездов и их сочетанием, а также неблагоприятными метеорологическими условиями.

2. На основе детального анализа кривых движения электропоезда при разных пусковых ускорениях определено, что при неизменном времени хода за счет большего пускового ускорения и меньшей скорости начала торможения расход энергии уменьшается, и наоборот при меньшем пусковом ускорении и большей скорости начала торможения расход энергии увеличивается.

3. Согласно расчетам, при полной населенности электропоезда пусковое ускорение уменьшается, время разгона в режиме тяги увеличивается на 25,8 %, а удельный расход энергии возрастает на 2,0 %.

Литература

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 г. № 2537р. Москва, 2016. 76 с.
2. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров ; под ред. И. П. Исаева. Москва : Транспорт, 1995. 294 с.
3. Фаминский Г. В. Экономия электроэнергии в электропоездах. Москва : Транспорт, 1970. 88 с.
4. Цукало П. В. Экономия электроэнергии на электроподвижном составе. Москва : Транспорт, 1983. 174 с.
5. Истомин С. Г., Штраухман А. А. Анализ эффективности эксплуатации электропоездов постоянного тока моторвагонного депо ТЧ-31 Омск // 115 лет железнодорожному образованию в Забайкалье: Образование. Наука. Производство : материалы Всероссийской научно-практической конференции. Чита, 2017. С. 56–62.
6. Истомин С. Г., Штраухман А. А. Анализ применения регрессионных моделей для оценки энергетической эффективности вспомогательного оборудования пригородных электропоездов постоянного тока серии ЭД4М // Транспорт Урала. 2018. № 4 (59). С. 81–85. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-81-85. ISSN 1815–9400.
7. Истомин С. Г., Штраухман А. А. Оценка энергетической эффективности оборудования для отопления и кондиционирования воздуха электропоездов постоянного тока серии ЭД4М // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2018. № 2. С. 148–152. ISSN 2071–3827.

References

1. The energy strategy of the holding Russian Railways for the period until 2020 and for the future until 2030 [Energeticheskaya strategiya kholdiniga «Rossiyskie 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. Theory of electric traction [Teoriya elektricheskoy tyagi] / V. E. Rozenfeld, I. P. Isaev, N. N. Sidorov, M. I. Ozerov ; ed. by I. P. Isaev. Moscow : Transport, 1995. 294 p.
3. Faminskiy G. V. Energy saving in electric trains [Ekonomiya elektroenergii v elektropoezdakh]. Moscow: Transport, 1970. 88 p.
4. Tsukalo P. Electricity saving on electric rolling stock [Ekonomiya elektroenergii na elektropodvizhnym sostave]. Moscow : Transport, 1983. 174 p.
5. Istomin S. G., Shtraukhman A. A. Efficiency analysis of DC electric multiple units at Omsk TCh-31 motive-coach depot [Analiz effektivnosti ekspluatatsii elektropoездov postoyannogo toka motorvagonnogo depo TCh-31 Omsk] // 115 years of railway education in Transbaikalia: Education. Science. Production : proceedings of All-Russia scientific and practical conference. Chita, 2017. Pp. 56–62.
6. Istomin S. G., Straukhman A. A. Analysis of the use of regression models to assess the energy efficiency of auxiliary equipment of commuter electric trains of direct current ED4M series [Analiz primeneniya regresionnykh modeley dlya otsenki energeticheskoy effektivnosti vpomogatel'nogo oborudovaniya prigorodnykh elektropoездов postoyannogo toka serii ED4M] // Transport of the Urals. 2018. No. 4 (59). Pp. 81–85. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-81-85. ISSN 1815–9400.
7. Istomin S. G., Straukhman A. A. Assessment of energy efficiency of equipment for heating and air conditioning of DC suburban electric trains of ED4M series [Otsenka energeticheskoy effektivnosti oborudovaniya dlya otopeniya i konditsionirovaniya vozdukh elektropoездов postoyannogo toka serii ED4M] // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. 2018. No. 2. Pp. 148–152. ISSN 2071–3827.

Объем статьи 0,62 авторских листа

УДК 621.316.12:621.332.3

Андрей Борисович Батрашов, ассистент кафедры «Электрические машины»
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Наталья Владимировна Гущина, старший преподаватель кафедры «Техносферная безопасность»
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Andrey Borisovich Batrashov, Assistant Lecturer, Electric Machinery Department,
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Natalya Vladimirovna Gushchina, Senior Lecturer, Technospheric Safety Department,
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Application of numerical modelling for assessing electric and thermal operation modes of direct current catenary elements

Аннотация

Предложена методика оценки электротепловых режимов работы элементов контактной сети постоянного тока, позволяющая определить электрические и тепловые нагрузки в эксплуатационных условиях. Основной принцип заключается в выявлении наиболее нагруженного участка на межподстанционной зоне и проведении электротеплового расчета в условиях реального графика движения поездов. Разработанную методику предполагается использовать при цифровизации железной дороги в качестве цифрового двойника контактной сети постоянного тока.

Ключевые слова: электротепловой расчет, контактная подвеска, постоянный ток, метод конечных элементов, межподстанционная зона, распределение температуры, токораспределение.

Summary

The paper proposes a method for assessing electric and thermal operation modes of direct current catenary elements that allows determining electric and thermal loads in operation conditions. The main principle is the determination of the most loaded section in the intersubstationary zone and calculation of electric and thermal characteristics in conditions of real train schedule. The method is assumed to be used at digitalization of railways as a digital copy of direct current catenary.

Keywords: electric and thermal calculation, catenary suspension, direct current, finite element method, intersubstationary zone, temperature distribution, current distribution.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-90-93

ВВЕДЕНИЕ

Одно из ключевых приоритетных направлений научно-технического развития Российской Федерации в целом [1] и холдинга ОАО «РЖД» в частности [2] — развитие передовых цифровых технологий, систем обработки больших объемов данных и искусственного интеллекта, что, в свою очередь, влечет за собой применение технологий и программного обеспечения для распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем [3].

Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации [4], планируется увеличение полигона обращения тяжеловесных поездов и создание инфраструктуры для скоростного и высокоскоростного пассажирского движения. При этом отмечается, что износ основных фондов на железнодорожном транспорте составляет 60 %. Неравномерность обновления инфраструктуры связана с несбалансированностью развития единой транспортной системы России: модернизации и реконструкции подвергаются в основном магистральные железнодорожные линии, имеющие принципиальное значение для экономики и безопасности государства. В связи с этим особую актуальность приобретает оценка использования остаточного ресурса действующей инфраструктуры как для существующих, так и для возрастающих объемов движения поездов.

При масштабной электрификации железных дорог первой была применена система электроснабжения постоянного тока, она и до сих пор используется в наиболее крупных агломерациях нашей страны вокруг таких городов, как Санкт-Петербург, Москва, Самара, Екатеринбург, Челябинск, Омск и Новосибирск. Относительно низкий уровень напряжения 3 кВ в контактной сети этой системы в совокупности с высокой загруженностью железнодорожных линий рассматриваемых направлений приводит к большим токовым и тепловым нагрузкам на контактную сеть и, как следствие, к росту отказов элементов контактной сети под тепловым воздействием электрического тока. Доля таких отказов уже составляет более 20 % всех отказов контактной сети. Значительная часть контактной сети, находящаяся в эксплуатации, была спроектирована и построена в 1950–1970-х гг.

Несмотря на высокие показатели износа основных фондов, капитальные затраты на реконструкцию и обновление всей протяженности сети дорог постоянного тока несопоставимо велики по сравнению с модернизацией только тех участков, на которых это действительно необходимо по условиям требуемой пропускной способности. Поэтому развитие цифровых и интеллектуальных технологий на железнодорожном транспорте для оценки существующей инфраструктуры оправданно не только из-за возможности обосновать адресное финансирование на устранение узких мест, но и из-за возможности масштабировать разрабатываемые технологии на инфраструктуру вне зависимости от проектных решений и времени строительства.

В рамках становления четвертой промышленной революции, известной как «Индустрис 4.0», а также проекта «Цифровая железнодорожная дорога» происходит постепенное наращивание цифровых двойников элементов инфраструктуры железной дороги [5]. При этом темпы развития цифровых технологий превышают темпы обновления инфраструктуры контактной сети. Сегодня требуется работать с цифровыми моделями реальной контактной сети, которая проектировалась задолго до появления этих технологий.

Оценка реальных эксплуатационных нагрузок на элементы контактной сети важна при построении моделей их разрушения, при расчете и уточнении ограничивающих межпоездных интервалов, токонесущей способности, остаточного ресурса, графиков технического обслуживания, ремонта и т. п.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При оценке тепловых режимов работы элементов контактной сети для цифровой модели требуется следующая информация:

геометрическая модель контактной сети;

набор расчетных данных о материалах;

условия контактных взаимодействий между элементами;

математические модели, описывающие физические процессы распределения тока и температуры;

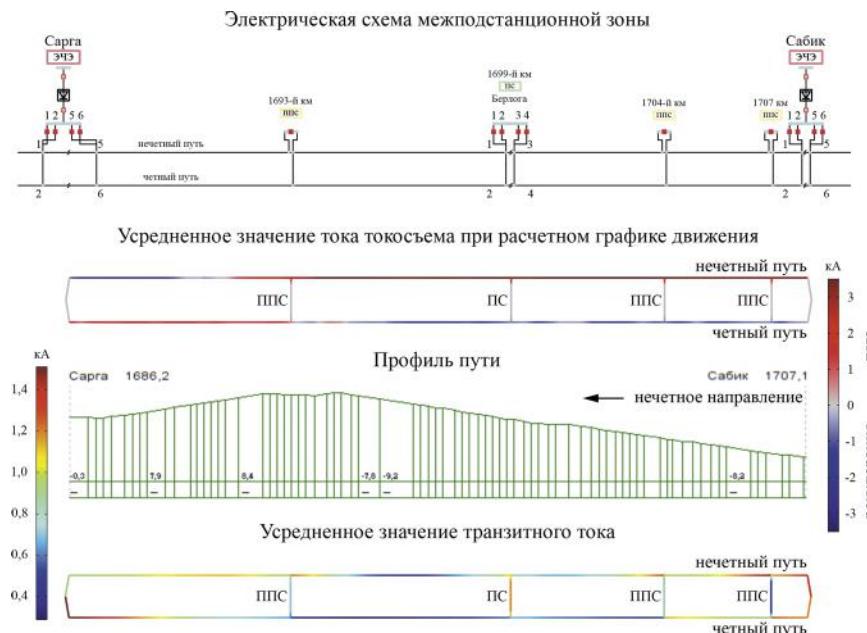


Рис. 1. Выбор места расположения расчетного анкерного участка:
ПС — пост секционирования; ППС — пункт параллельного соединения

эксплуатационные данные токовой нагрузки, графика движения поездов, данные о состоянии окружающей среды.

Построение детализированной геометрической модели контактной сети в масштабах межподстанционной зоны достаточно трудоемкий процесс с точки зрения вычислительных ресурсов, требуемых для решения электротепловой задачи. В связи с этим сначала оценивается наибольшая токовая и тепловая нагрузка на межподстанционной зоне (МПЗ) с учетом расчетного графика движения поездов.

Рассмотрим процесс оценки теплового режима работы контактной сети на участке Сарга — Сабик Свердловской железной дороги. Расчет выполняется для режима прохода пакетов поездов 6300 — 9000 — 6300 т по нечетному пути и 5000 — 3000 — 5000 т по четному пути с межпоездным интервалом 10 мин. Электрическая схема межподстанционной зоны, на которой оценивается наиболее нагруженный анкерный участок, представлена на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что наиболее нагруженный участок находится на нечетном пути вблизи тяговой подстанции Сабик после пункта параллельного соединения. Таким образом, геометрия строится на основании выбора места расположения

расчетного анкерного участка на МПЗ. На рис. 2 показана расчетная геометрия межподстанционной зоны с подробной отрисовкой расчетного анкерного участка, на котором оцениваются тепловые режимы работы элементов контактной сети. В местах соединения и крепления проводов контактной сети отрисовываются элементы арматуры. Остальные участки контактной сети МПЗ представляются в виде линий с эквивалентным параметром электропроводности для целой контактной подвески четного и нечетного путей соответственно, а также поста секционирования и пунктов параллельного соединения.

Для всех элементов контактной сети необходимо ввести следующие свойства: поперечное сечение, погонное электрическое сопротивление, погонную массу, теплопроводность, теплоемкость. Для контактного провода и эквивалентных участков на МПЗ задается условие перемещения погонных источников тока, соответствующих токоприемникам электроподвижных составов при расчетном графике движения. В местах соединения проводов и арматуры контактной сети описываются условия контакта с соответствующими параметрами теплового и электрического переходных сопротивлений.

Математическая модель расчета распределения тока и температуры в контактной сети постоянного тока основывается на законе непрерывности электрического тока (1) и уравнении нестационарного теплового баланса (2):

$$\frac{1}{R_{\Pi \Gamma}(T)} \cdot \Delta V = -f, \quad (1)$$

$$A \left(c(T) \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - k(T) \cdot \Delta T \right) = Q_J + Q_{SH} - Q_C - Q_R, \quad (2)$$

где $R_{\Pi \Gamma}$ — погонное электрическое сопротивление, Ом/м; T — искомая температура элемента, К; V — искомый электрический потенциал элемента, В; f — погонный источник тока, соответствующий потребляемому току токоприемника ЭПС, А/м; A — поперечное сечение элемента контактной сети, м²; c — теплоемкость материала элемента, Дж/(кг·К); ρ — плотность материала элемента, кг/м³; k — теплопроводность элемента, Вт/(м·К); t — время, с; Q_J — резистивный нагрев, Вт/м; Q_{SH} — поток солнечной радиации, Вт/м; Q_C — конвективное охлаждение, Вт/м; Q_R — лучеиспускание, Вт/м.

Подробные выкладки и применение формул при расчете описаны в работах [6, 7].

Связанный расчет электрических и тепловых процессов, протекающих в контактной сети, представляет собой сложную междисциплинарную задачу, которая успешно решается с помощью метода конечных элементов. Нами использовалась программная среда COMSOL Multiphysics с физическим интерфейсом Coefficient Form Edge PDE.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ

Рассмотрим результат снижения температуры несущего троса вблизи узла крепления троса средней анкеровки после использования модернизированной конструкции, направленной на выравнивание тепловой и электрической нагрузки [8] (рис. 3).

Модернизация узла заключается в удлинении концов троса средней анкеровки до несущего троса и контактных проводов. Таким образом осуществляется поперечное шунтирование на-

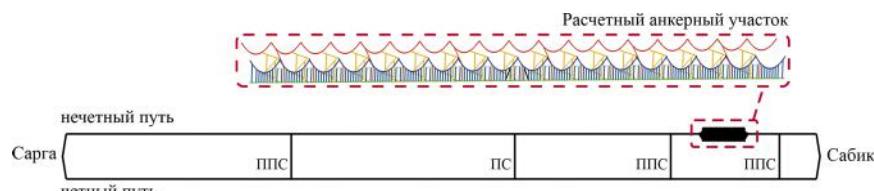


Рис. 2. Расчетная геометрия межподстанционной зоны



Рис. 3. Модернизированная конструкция узла троса средней анкеровки

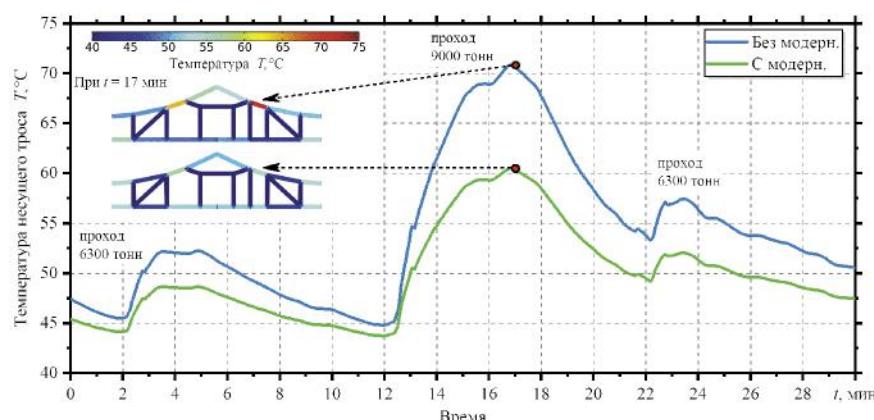


Рис. 4. Изменение температуры несущего троса при модернизации узла средней анкеровки

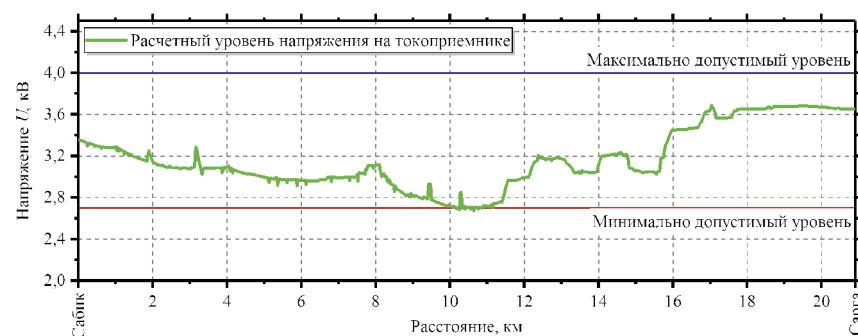


Рис. 5. Уровень напряжения на токоприемнике при движении поезда массой 9000 т по нечетному пути

клонно расположенного троса средней анкеровки.

Из рис. 4, на котором представлены зависимости температуры несущего троса вблизи крепления троса средней анкеровки, видно, что вдоль продольных проводов происходит выравнивание температур.

Рассмотренный участок несущего троса — одно из наиболее нагруженных мест при нормальном режиме работы. При этом ожидаемое снижение межпоездного интервала в данном случае не может быть достигнуто из-за ограничения по минимально допустимому уровню напряжения на токоприемнике 2,7 кВ (рис. 5).



Очевидно, что выравнивание токовой и тепловой нагрузки не повлияет на изменение уровня напряжения на токоприемнике — для этих целей необходимо использовать иные мероприятия по модернизации.

Отметим, что на основе рассмотренной методики расчета электротепловых режимов работы элементов контактной сети постоянного тока можно моделировать эксплуатационные режимы для любого элемента контактной сети, который непосредственно влияет на ее электротепловые процессы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчет реальных эксплуатационных нагрузок на элементы контактной сети дает возможность оценивать допустимость пропуска поездов повышенной массы, эффективность и очередность

мероприятий по модернизации контактной сети, исследовать влияние дефектных элементов на температуру, выполнять обосновывающие расчеты при возникновении аварийных ситуаций.

Таким образом, для анализа реальных нагрузок в элементах контактной сети при использовании расчетной методики и программного обеспечения по управлению информацией (PDM-системы) и управлению жизненным циклом (PLM-системы) контактной сети (с применением моделей старения [9]) достаточно только исполненного графика движения поездов (как по данным о токовой нагрузке подвижного состава, так и по результатам тяговых расчетов). Поэтому представленная методика может рассматриваться как завершенная часть системы инженерного анализа (CAE) электротепловых процессов в общей структуре PLM-системы контактной сети.

Литература

1. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года : указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201805070038> (дата обращения: 19.11.2019).
2. Об утверждении программы развития ОАО «РЖД» до 2025 года : распоряжение правительства Российской Федерации от 19.03.2019 г. № 466-р. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=7017 (дата обращения: 19.11.2019)
3. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации : указ Президента Российской Федерации от 07.07.2011 г. № 899 (в ред. от 16.12.2015 г.). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902287707> (дата обращения: 19.11.2019).
4. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 г. № 1734-р (в ред. от 12.05.2018 г.). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902132678> (дата обращения: 19.11.2019).
5. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства / Н. В. Курганова, М. А. Филин, Д. С. Черняев [и др.] // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Vol. 7. No. 5. Pp. 105–115. ISSN 2307-8162.
6. Батрашов А. Б., Паранин А. В., Шумаков К. Г. Совершенствование математической модели расчета электротепловых процессов в контактной подвеске постоянного тока // Транспорт Урала. 2019. № 1 (60). С. 90–96. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-90-96. ISSN 1815-9400.
7. Батрашов А. Б. Совершенствование электротепловых расчетов и характеристики контактной сети постоянного тока : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2019. 216 с.
8. Устройство средней анкеровки компенсированной контактной подвески / А. Б. Батрашов, А. В. Паранин : патент на полезную модель 192286 Рос. Федерация. № 2019113958 ; заявл. 06.05.19 ; опубл. 11.09.19, Бюл. № 26.
9. Галкин А. Г. Теория и методы расчетов процессов проектирования и технического обслуживания контактной сети : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Екатеринбург, 2002. 370 с.

References

1. On national goals and strategic tasks of development of the Russian Federation for the period up to 2024 [O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiiyskoy Federatsii na period do 2024 goda] : Decree of the President of the Russian Federation dated 07.05.2018 No. 204. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201805070038> (access date: 19.11.2019).
2. On approval of the JSC Russian Railways development program up to 2025 [Ob utverzhdenii programmmy razvitiya OAO «RZhD» do 2025 goda] : Order of the Government of the Russian Federation dated 19.03.2019 No. 466-r. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=7017 (access date: 19.11.2019)
3. On approval of priority directions of science, technologies and engineering development in the Russian Federation and the list of crucial technologies of the Russian Federation [Ob utverzhdenii prioritetnykh napravleniy razvitiya nauki, tekhnologiy i tekhniki v Rossiyskoy Federatsii i perechnya kriticheskikh tekhnologiy Rossiyskoy Federatsii] : Decree of the President of the Russian Federation dated 07.07.2011 No. 899 (in edition from 16.12.2015). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902287707> (access date: 19.11.2019).
4. On approval of the Russian Federation transport strategy for the period up to 2030 [Ob utverzhdenii Transportnoy strategii Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda] : Order of the Government of the Russian Federation dated 22.11.2008 No. 1734-r (in edition from 12.05.2018). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902132678> (access date: 19.11.2019).
5. Digital twins' introduction as one of the major directions of industrial digitalization [Vnedrenie tsifrovyykh dvoynikov kak odno iz klyuchevykh napravleniy tsifrovizatsii proizvodstva] / N. V. Kurganova, M. A. Filin, D. S. Cherniaev et al. // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Vol. 7. No. 5. Pp. 105–115. ISSN 2307-8162.
6. Batrashov A. B., Paranim A. V., Shumakov K. G. Improvement of mathematical model for calculation of electrothermal processes in a DC catenary suspension [Sovershenstvovanie matematicheskoy modeli rascheta elektroteplovyykh protsessov v kontaktnoy podveske postoyannogo toka] // Transport of the Urals. 2019. No. 1 (60). Pp. 90–96. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-90-96. ISSN 1815-9400.
7. Batrashov A. B. Development of electric and thermal calculations and characteristics of direct current catenary [Sovershenstvovanie elektroteplovyykh raschetov i kharakteristik kontaktnoy seti postoyannogo toka] : PhD in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2019. 216 p.
8. Midpoint anchoring system of constant-tension catenary suspension [Us-troystvo sredney ankerovki kompensirovannoy kontaktnoy podveski] / A. B. Batrashov, A. V. Paranim : patent for utility model 192286 Russian Federation. No. 2019113958 ; filed 06.05.19 ; publ. 11.09.19, Bulletin No. 26.
9. Galkin A. G. Theory and methods of calculating catenary design and maintenance processes [Teoriya i metody raschetov protsessov proektirovaniya i tekhnicheskogo obsluzhivaniya kontaktnoy seti] : DSc in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2002. 370 p.



УДК 621.316.925

Сергей Анатольевич Филиппов, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение» Забайкальского института железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ), Чита, Россия,

Руслан Сергеевич Трифонов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение» Забайкальского института железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ). Чита, Россия,

Оксана Александровна Соловьёва, ассистент кафедры «Электроснабжение» Забайкальского института железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ), Чита

ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ФИДЕРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ В УСЛОВИЯХ ОРГАНИЗАЦИИ ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ДВИЖЕНИЯ

Sergey Anatolyevich Filippov, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Power Supply Department, Trans-Baikal Institute of Railway Transport (ZabIZhT), Chita, Russia,

Ruslan Sergeevich Trifonov, PhD in Engineering, Associate Professor, Power Supply Department, Trans-Baikal Institute of Railway Transport (ZabIZhT), Chita, Russia,

Oksana Alexandrovna Solovyeva, Assistant Lecturer, Power Supply Department, Trans-Baikal Institute of Railway Transport (ZabIZhT), Chita, Russia

Factor analysis of operation of catenary feeders' distance protection in conditions of heavy-load trains operation

Аннотация

В статье рассмотрена связь факторов, которые оказывают влияние на работу дистанционной защиты фидеров контактной сети. Выполнена оценка этого влияния на качество работы и селективность защиты в условиях пропуска тяжеловесных поездов массой до 12000 т на примере измерений, проведенных на Забайкальской железной дороге.

Ключевые слова: релейная защита, селективность, дистанционная защита, система тягового электроснабжения.

Summary

The paper considers a connection of factors that affect the operation of distance protection of catenary feeders. The paper also presents an assessment of this effect on operation quality and selectivity of protection in conditions of operation of heavy-load trains with the weight up to 12,000 tons on example of measurements carried out on the Zabaikalsk Railway.

Keywords: relay protection, selectivity, distance protection, traction power supply system.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-94-99

94

Январь – Март

О беспечение экономического развития России и ее конкурентоспособности — ключевая задача для государства, в том числе в условиях существующих санкций. Железнодорожная инфраструктура представляет собой одну из базовых составляющих экономического развития, где приоритетными являются отношения со странами Юго-Восточного региона, в первую очередь с Китаем. Забайкальская железная дорога играет весомую роль в решении стратегической задачи ОАО «РЖД» по обеспечению надежности перевозочного процесса. В настоящее время обстоятельствами, осложняющими достижение целей повышения надежности, качества и бесперебойности движения, являются климатические условия Забайкальского региона, сложный профиль пути и постоянное уплотнение графика движения поездов при увеличении их веса.

Совокупность данных тенденций привела к следующим фактам:

во-первых, поезда весом от 6300 до 12600 т (каждый четвертый) стали нормой;

во-вторых, требования к бесперебойности движения сегодня высоки как никогда, поскольку каждая минута простоя оборачивается значительными потерями для компании и экономики страны.

Бесперебойность движения поездов напрямую зависит от работы устройств релейной защиты. Повышенный вес поезда приводит к увеличению максимального рабочего тока до значений, близких к значениям предельно допустимого тока подвески.

В таких условиях, если защита не сработает, произойдет повреждение контактной подвески, что обернется значительными экономическими потерями из-за возможных простоев или ограничений движения на время ее восстановления. Если защита сработает излишне или ложно, это вызовет необоснованные остановки поездов.

Основные функции защиты фидеров контактной сети возложены на дистанционную защиту (ДЗ ФКС). На качественную работу защиты влияет множество факторов, из которых не все учитываются в нормативных методиках расчета, но непосредственно значимо влияют на расчетное сопротивление уставки, а следовательно, на то, как будет работать защита [1–6].

В статье представлен анализ максимально возможного количества значимых факторов, оказывающих влияние на работу дистанционной защиты фидеров контактной сети в условиях пропуска тяжеловесных поездов.

В первом приближении эти факторы можно классифицировать по трем основным группам (рис. 1):

группа 1 — факторы, относящиеся к системе внешнего электроснабжения (СВЭ);

группа 2 — факторы, относящиеся к системе тягового электроснабжения (СТЭ);

группа 3 — внутренние факторы, т.е. факторы, связанные непосредственно с терминалом защиты.

Иерархически группа СВЭ стоит выше группы СТЭ, и соответственно от ее характеристик напрямую зависит работа как самой системы в целом, так и дистанционной защиты (рис. 2) в частности.

Значимость компенсации реактивной мощности проявляется в том, что перетоки реактивной мощности через СТЭ скаживаются на уровне напряжения в контактной сети, а значит, и на величине сопротивления. При этом ситуация осложняется тем, что включение и отключение компенсации может производиться без согласования с режимами работы СТЭ. Это влияет на параметры сети и де-факто приводит к тому, что защита должна иметь два набора уставок и переключаться между ними.

Современные терминалы позволяют обеспечить подобную возможность, однако, ввиду того что фактически такие переключения производятся случайным образом и без предупреждения, данная функция защиты не задействуется.

Третий неявный и неочевидный фактор — при расчёте параметров системы и уставок защиты неопределенность внешних условий выражается в том, что все параметры имеют допустимый диапазон изменений, который должен включать в себя все возможные вариации и тем самым нивелировать подобные эффекты [1, 3].

Однако в условиях пропуска тяжеловесных составов происходит постепенное смещение сопротивлений нагрузки к правой границе зоны срабатывания защиты, и в ряде случаев однозначно разграничить нормальный и аварийный режимы становится невозможным. Это приводит к тому, что при необходимости выбора между отказом и ложным срабатыванием приоритет отдается ложному срабатыванию [3, 5, 6].

Факторы СТЭ, от которых зависит работа ДЗ ФКС, представлены на рис. 3.

Нормальный режим определяется значительной группой параметров и факторов, оказывающих влияние на работу защиты (рис. 4).

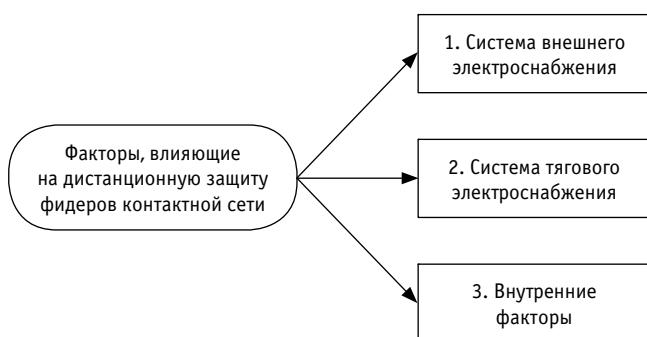


Рис. 1. Классификация факторов, влияющих на работу дистанционной защиты фидеров контактной сети



Рис. 2. Параметры СВЭ, влияющие на работу ДЗ ФКС

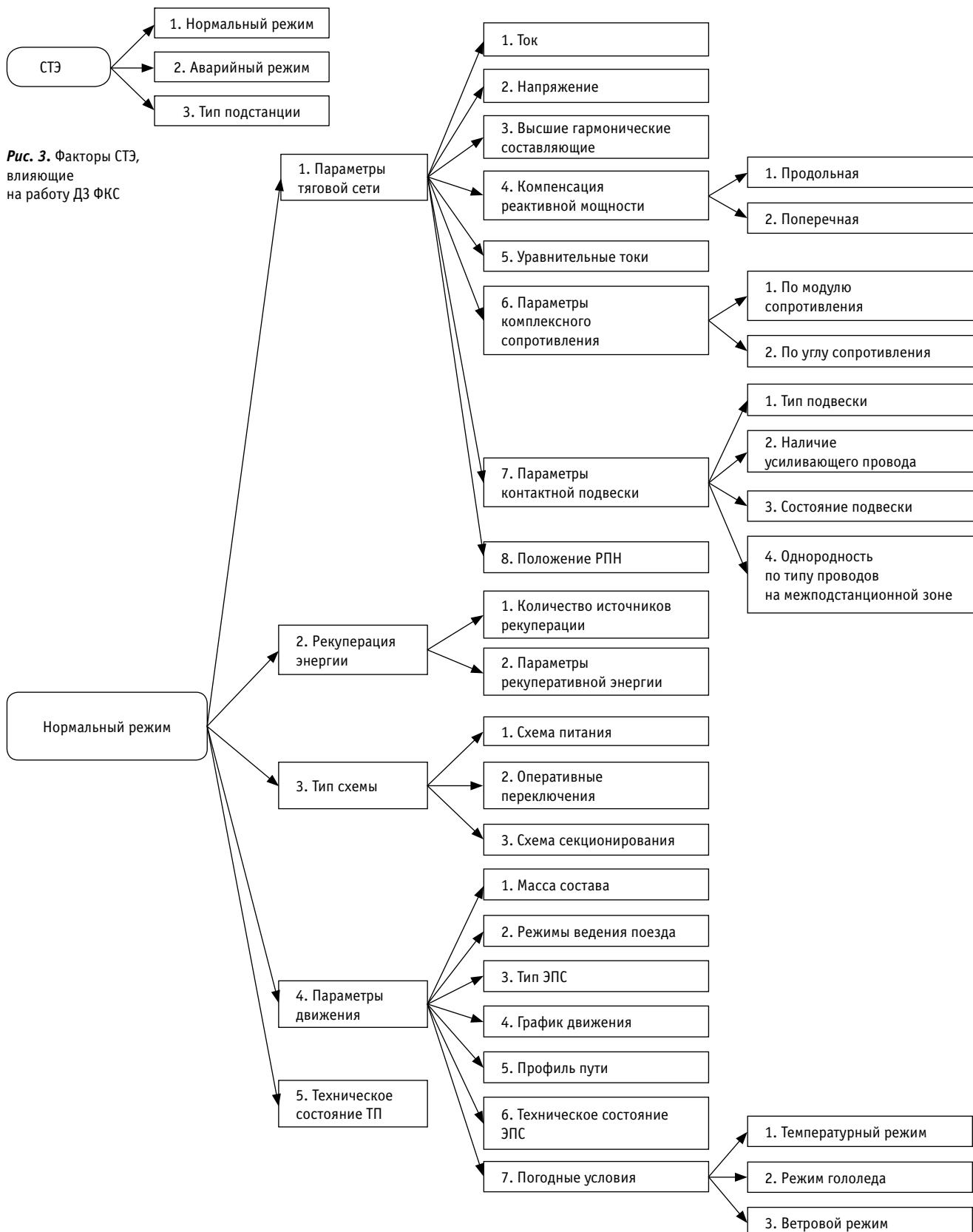


Рис. 4. Параметры нормального режима, влияющие на работу ДЗ ФКС

Ток и напряжение при пропуске поездов стандартной массы варьируются в установленных параметрах, определяемых нормативными документами. Утвержденные методики расчета ориентированы на данные условия.

Однако при пропуске поездов повышенной массы ситуация меняется кардинальным образом, так как контролируемые терминалом параметры нормально-го режима смещаются к границам зоны срабатывания защиты или даже пересекают ее. Это, в свою очередь, сказывается на значении сопротивления и величине его угла, поскольку данные параметры не поддаются прямому измерению, а формируются через ток и напряжения [2, 4].

В качестве иллюстрации этого тезиса приведем диаграмму рассеяния комплексного сопротивления нагрузки и тока, полученную в результате анализа измерений, проведенных на Забайкальской железной дороге (рис. 5).

Как видно из диаграммы, при токе нагрузки более 700 А сопротивление, измеряемое защитой, снижается до значения менее 40 Ом, что соответствует поездам массой от 7000 т и выше. При этом следует отметить, что сегодня поезда массой 12600 т для Забайкальской железной дороги являются нормой.

Из всех факторов нормального режима наибольшее влияние на работу ДЗ ФКС оказывают:

среди параметров движения — масса состава и график движения, которые непосредственно влияют на величину комплексного сопротивления, измеряемого защитой, де-факто являясь случайными величинами относительно отдельно рассматриваемого комплекта защиты;

профиль пути — его стоит отметить отдельно, так как он не поддается нивелировке и фактически определяет исходные условия, является постоянной величиной относительно конкретного комплекта ДЗ;

среди параметров тяговой сети это напряжение и ток в сети относительно конкретного фидера, а также наличие уравнительных токов и компенсации реактивной мощности.

При возникновении короткого замыкания дистанционная защита и ее замеры определяются факторами, представленными на рис. 6.

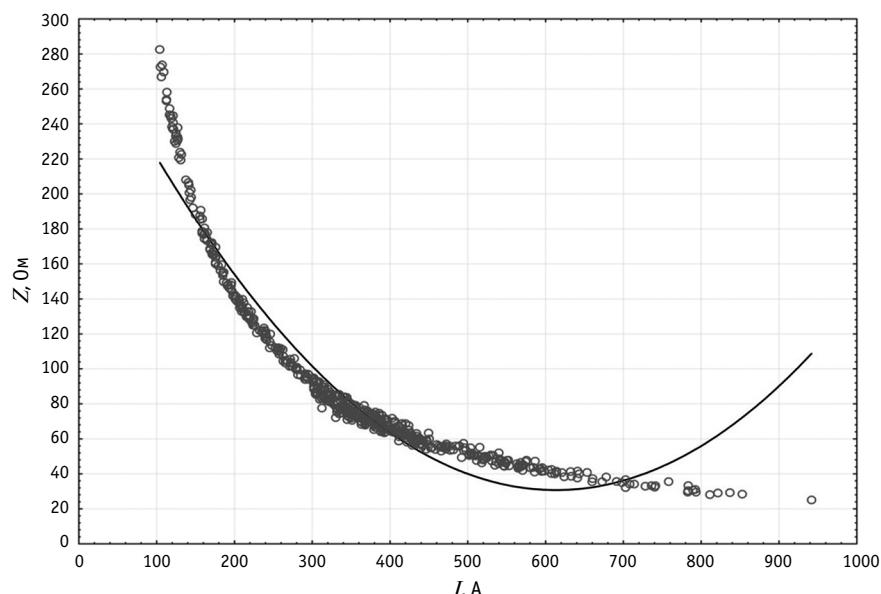


Рис. 5. Диаграмма рассеяния комплексного сопротивления нагрузки и тока поезда



Рис. 6. Параметры аварийного режима, влияющие на работу ДЗ ФКС

Зоны расположения векторов сопротивления в нормальном и аварийном режимах, построенные для классических ситуаций 1970–1980-х гг., иллюстрирует рис. 7.

На рис. 7 обозначено: Z_N — допустимая область изменения параметров нормального режима; Z_H — комплексное сопротивление нагрузки нормального режима; φ_{ZH} — угол комплексного сопротивления нормального режима; Z_F — допустимая область изменения параметров аварийного режима; Z_K — комплексное сопротивление аварийного режима; φ_{ZK} — угол комплексного сопротивления аварийного режима.

Алгоритмы резервной ступени дистанционной защиты фидеров контакт-

ной сети в этих условиях работали надежно и селективно.

Проблемы в работе ДЗ ФКС при пропуске тяжеловесных составов возникают по причине перекрытия значений контролируемых параметров защиты. Сегодняшняя поездная ситуация, как показано на диаграмме (см. рис. 5), приводит к тому, что эти области из-за постоянно-го увеличения масс поездов, сокращения межпоездного интервала и несовершенства работы ЭПС перекрываются. Обобщенные результаты экспериментальных замеров, иллюстрирующие этот тезис, представлены на рис. 8.

В таких условиях при существую-щем алгоритме работы резервной ступени дистанционной защиты фидеров

контактной сети во всех возможных вариациях разделение параметров нормального и аварийного режимов невозможno. Следовательно, настройка защиты на надежную селективную работу при КЗ приводит к ложным срабатываниям в нормальном режиме, что связано с особенностями идентификации режима СЭ резервной ступенью.

Внутренние факторы, влияющие на работу ДЗ ФКС, представлены на рис. 9.

Группа данных факторов характеризуется двумя основными свойствами: во-первых, все, что касается человеческого фактора, — случайно и достаточно проблематично поддается контролю, измерению и проверке; во-вторых, все, что касается качества исполнения конкретного терминала, принимается как исходная величина, не поддающаяся контролю со стороны заказчика до момента ввода терминала в эксплуатацию и его тестирования.

В целом анализ факторов выявил, что параметров, оказывающих влияние на непосредственную работу ДЗ, значительно больше, чем учитывают существующие методики расчета. Эти методики позволяли надежно рассчитать уставки защиты при массах поездов и размерах движения, актуальных на момент их создания, причем со значительным запасом.

Сегодня ситуация изменилась, так как пропуск поездов массой до 12600 т приводит к тому, что происходит перекрытие зон нормального и аварийного режима (см. рис. 8).

В сложившихся обстоятельствах изменения подхода к расчету уставок не дадут необходимого эффекта, так как проблема состоит не в уставках, а в алгоритмах работы защиты, которые не претерпели каких-либо значительных изменений, кроме технических моментов, связанных с переходом на новую элементную базу.

При этом современная микропроцессорная элементная база дает возможность реализовать новые возможности в работе алгоритмов, которые раньше были недоступны. Предварительный анализ отечественных и зарубежных публикаций позволил установить, что одним из перспективных подходов является использование алгоритмов, способных адаптироваться к условиям перекрытия режимов и принять необходимое решение о селективном срабатывании.

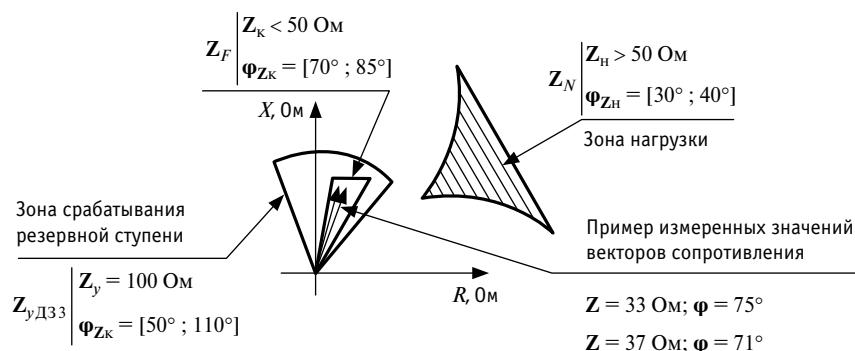


Рис. 7. Зоны уставок и нагрузки для ситуации 1970–1980-х гг.

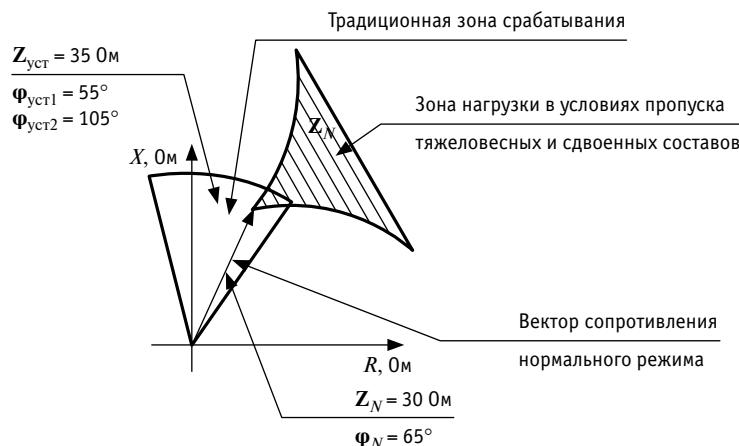


Рис. 8. Зоны уставок и нагрузки для существующей ситуации

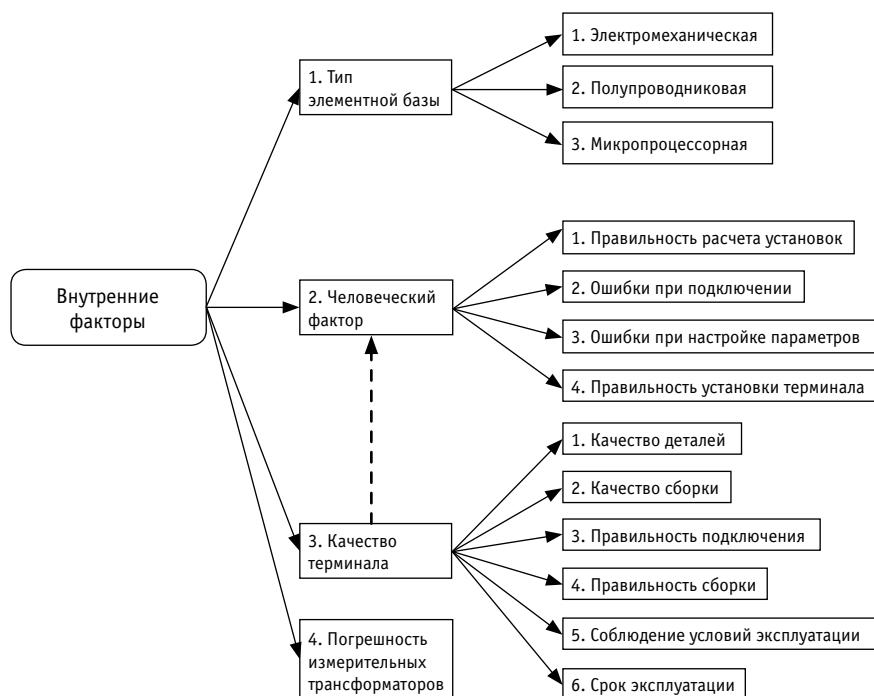


Рис. 9. Внутренние факторы, оказывающие влияние на работу ДЗ ФКС



Литература

- Филиппов С. А., Трифонов Р. С. Оценка обеспечения селективности резервных ступеней дистанционной защиты фидеров контактной сети на основе адаптивной идентификации // Транспорт Урала. 2013. № 4 (39). С. 87–92. ISSN 1815–9400.
- Трифонов Р. С. Особенности определения токов нормального режима системы тягового электроснабжения для анализа работы релейной защиты фидеров контактной сети // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2012. № 1. С. 393–396. ISSN 2071–3827.
- Филиппов С. А., Яковлев Д. А., Трифонов Р. С. Разработка способа идентификации режима работы системы тягового электроснабжения третьей ступенью дистанционной защиты фидеров контактной сети при пропуске поездов повышенной массы // Вестник РГУПС. 2015. № 2 (58). С. 132–140. ISSN 0201–727X.
- Филиппов С. А., Соловьёва О. А. Анализ работы определителей мест повреждения в контактной сети электрифицированных железных дорог // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы девятой международной научно-практической конференции / ИрГУПС. Иркутск, 2018. С. 370–373.
- Лямец Ю. Я., Воронов П. И., Мартынов М. В. Распознавающая способность адаптивной дистанционной защиты линии электропередачи // Электричество. 2015. № 10. С. 13–20. ISSN 0013–5380.
- Минь Ч. Х. К., Шмойлов А. В. Техническая эффективность дистанционных релейных защит высоковольтных линий // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320. № 4. С. 72–78. ISSN 2500–1019.

References

- Filippov S. A., Trifonov R. S. Evaluation of selectivity of backup distance protection stages of overhead system feeders based on adaptive identification [Otsenka obespecheniya selektivnosti rezervnykh stupenej distantsionnoy zashchity fiderov kontaktnoy seti na osnove adaptivnoy identifikatsii] // Transport of the Urals. 2013. No. 4 (39). Pp. 87–92. ISSN 1815–9400.
- Trifonov R. S. Features of determining the normal mode currents of the traction power supply system for the analysis of the relay protection of the contact network feeders [Osobennosti opredeleniya tokov normal'nogo rezhima sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya dlya analiza raboty releynoy zashchity fiderov kontaktnoy seti] // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. 2012. No. 1. Pp. 166–169. ISSN 2071–3827.
- Filippov S. A. Yakovlev D. A., Trifonov R. S. Method for identifying system mode of traction power supply on the third stage distance feeder of protection contact network at passing increased mass trains [Razrabotka sposoba identifikatsii rezhima raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya tretyey stupenyu distantsionnoy zashchity fiderov kontaktnoy seti pri propuske poezdov povyshennoy massy] // Vestnik RGUPS. 2015. No. 2 (58). Pp. 132–140. ISSN 0201–727X.
- Filippov S. A., Solovyeva O. A. Analysis of the work of determinants of places of damage in the contact network of electrified railways [Analiz raboty opredeliteley mest povrezhdeniya v kontaktnoy seti elektritsirovannykh zheleznykh dorog] // Transport Infrastructure of the Siberian Region: materials of the Ninth International Scientific and Practical Conference / ISTU. Irkutsk, 2018. Pp. 370–373.
- Lyamets Yu. Ya., Voronov P. I., Martynov M. V. The recognition of the adaptive capacity of the power line distance protection [Raspoznayushchaya sposobnost' adaptivnoy distantsionnoy zashchity linii elektroperedachi] // Electricity. 2015. No. 10. Pp. 13–20. ISSN 0013–5380.
- Ming Ch. Kh. K., Shmoylov A. V. Technical efficiency of distance relay protection of high voltage lines [Tekhnicheskaya effektivnost' distantsionnykh releynykh zashhit vysokovol'tnykh liniy] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2012. Vol. 320. No. 4. Pp. 72–78. ISSN 2500–1019.

Объем статьи 0,67 авторских листа



УДК 621.331.3.024

Ермек Кенжебулатович Хусаинов, аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Юрий Владимирович Кондратьев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ФУНКЦИЕЙ АДАПТАЦИИ К ТЯГОВОМУ РЕЖИМУ

Ermek Kenzhebulatovich Khusainov, postgraduate student, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Yuriy Vladimirovich Kondratyev, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Efficiency of direct current catenary distance protection with adaptation to traction mode

Аннотация

В статье рассматривается эффективность дистанционной защиты контактной сети постоянного тока с функцией адаптации к тяговому режиму электроподвижного состава. Выявлено влияние наклона внешней характеристики выпрямительных преобразователей тяговых подстанций на итоговую эффективность защиты. Введены понятия показателей эффективности использования дистанционной защиты с функцией адаптации: коэффициента, определяющего долю увеличения пикового тока срабатывания; коэффициента, определяющего долю снижения минимального напряжения на шинах тяговой подстанции; коэффициента, определяющего долю увеличения максимальной пиковой мощности, реализуемой со стороны постоянного тока напряжением 3,3 кВ, фидера контактной сети. Приведены способы их вычисления.

Ключевые слова: контактная сеть, тяговая подстанция, дистанционная защита, дистанционная защита с функцией адаптации, внешняя характеристика.

Summary

The paper considers efficiency of distance protection with adaptation to rectifier converters of traction substations with different number of pulsations. The authors have revealed the influence of inclination of the external characteristic of rectifier converters on total efficiency of protection. They have also introduced notions for indicators of efficiency of distance protection with adaptation: coefficient that determines the increase ratio of peak operating current; coefficient that determines the decrease ratio of minimal voltage on traction substation buses; coefficient that determines the increase ratio of maximal peak power of catenary feeder realized by 3.3 kV direct current. The paper presents methods of their calculation.

Keywords: catenary, traction substation, distance protection, distance protection with adaptation, external characteristic.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-100-103

Главное преимущество дистанционной защиты (ДЗ) перед токовыми защитами — отсутствие влияния параметров системы внешнего электроснабжения на значение уставки срабатывания [1, 2]. Это объясняется принципом измерения сопротивления петли короткого замыкания от места установки защиты до точки повреждения. Однако достоинство ДЗ, состоящее в измерении сопротивления петли короткого замыкания и независимости уставки ДЗ от уровня напряжения на шинах постоянного тока, становится не таким выраженным при эксплуатации в нормальном режиме, когда максимальные рабочие токи соизмеримы, а в некоторых случаях и превышают минимальные токи короткого замыкания.

Для каждого выпрямительного агрегата (ПВ), включающего в себя преобразовательный трансформатор и выпрямитель, важным показателем является внешняя характеристика — зависимость выпрямленного напряжения U_d от среднего значения тока нагрузки I_d :

$$U_d = f(I_d). \quad (1)$$

где U_d — выпрямленное напряжение выпрямителя, В; I_d — ток нагрузки выпрямителя, А.

Уравнение внешней характеристики неуправляемого выпрямителя со слаживающим фильтром можно представить в виде

$$U_d = U_{d0} - \Delta U_T - \Delta U_\Phi - \Delta U_X, \quad (2)$$

где U_{d0} — напряжение холостого хода выпрямителя, В; ΔU_T и ΔU_Φ — падение напряжения на активных сопротивлениях обмоток трансформатора и слаживающего дросселя, В; ΔU_X — коммутационное падение напряжения, В.

Из уравнения (2) следует, что напряжение на выходе выпрямителя линейно зависит от тока нагрузки и графически представляет прямую линию (рис. 1), наклон которой к оси абсцисс

определяется внутренним падением напряжения от тока. Влияние активных и реактивных элементов схемы в зависимости от мощности различно. В выпрямителях средней и большой мощности преобладает влияние индуктивного сопротивления X_T обмоток трансформатора.

Для определения наклона внешней характеристики в [3] введено понятие эквивалентного сопротивления R_{Θ} , Ом:

$$R_{\Theta} = \frac{U_{d0} - U_d}{I_d} = \frac{\Delta U_T + \Delta U_{\Phi} + \Delta U_X}{I_d} = \frac{\Delta U_d}{I_d}. \quad (3)$$

В соответствии с [4–6] уравнение внешней характеристики (1), определяющее уровень напряжения на выходе ПВ в зависимости от величины, имеет следующий вид:

$$U_d(I_d) = U_{d0} \left(1 - \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) u_k \frac{I_d}{I_{d\text{ном}}} \right), \quad (4)$$

где u_k — приведенное напряжение короткого замыкания преобразовательного трансформатора, %; $I_{d\text{ном}}$ — номинальный выпрямленный ток, А; m — число пульсаций выпрямленного напряжения за период.

Используя выражение (4), построим внешние характеристики 6-, 12- и 24-пульсового выпрямителей. Значения U_{d0} и u_k примем для них равными, тогда внешние характеристики будут иметь вид, представленный на рис. 2. Сопротивления системы внешнего электроснабжения также приняты равными для всех трех типов выпрямителей.

Падения напряжения ΔU_d , как и приведенные в работе [5], при номинальном токе $I_{d\text{ном}} = 3150$ А принимают следующие значения:

для 6-пульсовых выпрямителей $\Delta U_{d(6)} \approx 310$ В;

для 12-пульсовых $\Delta U_{d(12)} = 160$ В;

для 24-пульсовых $\Delta U_{d(24)} = 80$ В.

Эффективность дистанционной защиты без функции адаптации ранее рассматривалась в работе [7]. Очевидно, что для оценки эффективности применения дистанционной защиты с функцией адаптации к тяговой нагрузке (ДЗА) необходимо учитывать внешнюю характеристику выпрямителей. Выражая U_d по (2), получаем

$$U_d = U_{d0} - R_{\Theta} I_d. \quad (5)$$

Сопротивление $R_{\text{изм}}$, измеряемое защитой в месте установки, вычисляется следующим образом:

$$R_{\text{изм}} = \frac{U_d}{I_d} = \frac{U_{d0} - R_{\Theta} I_d}{I_d}. \quad (6)$$

Преобразуя отношение (5) и выражая I_d , получаем

$$I_d = \frac{U_{d0}}{R_{\text{изм}} + R_{\Theta}}. \quad (7)$$

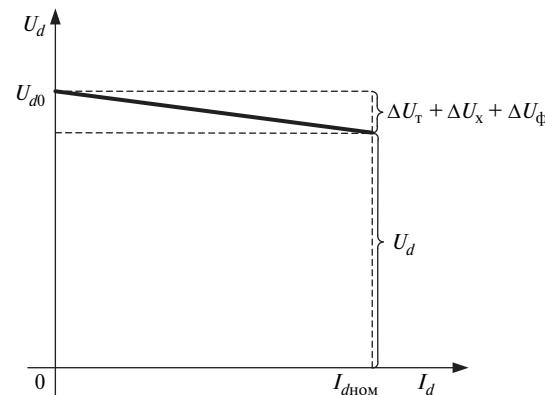


Рис. 1. Внешняя характеристика выпрямителей большой мощности для неуправляемых схем

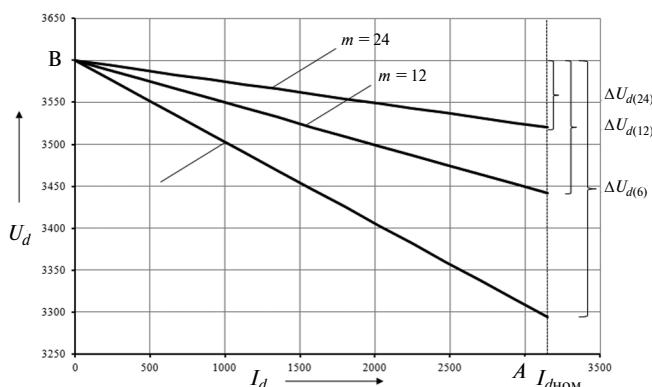


Рис. 2. Пример внешних характеристик 6-, 12- и 24-пульсового выпрямителя

Изменение чувствительности защит контактной сети постоянного тока при адаптации к току тяговой нагрузки исследовалось в [8]. Условие срабатывания ДЗА выполняется при снижении значения $R_{\text{изм}}$ ниже значения уставки R_y . Значение уставки срабатывания ДЗА R_y определяется в соответствии с [9–11]. В процессе возрастания тока, протекающего по фидеру контактной сети, уставка R_y корректируется и принимает значение R'_y . Степень корректировки выбирается в соответствии с коэффициентом адаптации k_a :

$$R'_y = \frac{R_y}{k_a}. \quad (8)$$

Пиковые значения максимальных рабочих токов, не вызывающих срабатывания дистанционной защиты с функцией адаптации $I'_{d\text{max}}$ и без нее $I_{d\text{max}}$, будут различны. Подставив значение уставки R_y в (7) вместо $R_{\text{изм}}$, получим пиковое значение максимального рабочего тока дистанционной защиты без адаптации $I_{d\text{max}}$, а подставив значение уставки R'_y , получим пиковое значение максимального рабочего тока дистанционной защиты с адаптацией $I'_{d\text{max}}$. Коэффициент $k_{\text{ДЗА}}$, отражающий долю увеличения пикового тока срабатывания при применении функции адаптации к тяговой нагрузке ЭПС, отнесен к показателям эффективности применения ДЗА:

$$I_{d\max} = \frac{U_{d0}}{R_y + R_\Theta}; \quad (9)$$

$$I'_{d\max} = \frac{U_{d0}}{\frac{R_y}{k_a} + R_\Theta}; \quad (10)$$

$$k_{\text{ДЗА}I} = \frac{I'_{d\max}}{I_{d\max}} = \frac{R_y + R_\Theta}{\frac{R_y}{k_a} + R_\Theta}. \quad (11)$$

Коэффициенты $k_{\text{ДЗА}U}$ и $k_{\text{ДЗА}P}$ также отнесем к показателям эффективности применения ДЗА: коэффициент $k_{\text{ДЗА}U}$ отражает долю снижения минимального напряжения на шинах тяговых подстанций (ТПС) при выполнении условий для срабатывания ДЗА, а коэффициент $k_{\text{ДЗА}P}$ — соответственно долю увеличения максимальной пиковой мощности, реализуемой со стороны фидера питания контактной сети:

$$k_{\text{ДЗА}U} = \frac{U'_{d\min}}{U_{d\min}} = \frac{R_y + R_\Theta}{R_y + k_a R_\Theta}; \quad (12)$$

$$k_{\text{ДЗА}P} = \frac{P'_{d\max}}{P_{d\max}} = \frac{(R_y + R_\Theta)^2}{\left(\frac{R_y}{\sqrt{k_a}} + \sqrt{k_a} R_\Theta\right)^2}, \quad (13)$$

где $U'_{d\min}$, $U_{d\min}$ — минимальные напряжения на шинах ТПС при выполнении условий для срабатывания ДЗ с адаптацией и без нее соответственно, кВ; $P'_{d\max}$, $P_{d\max}$ — максимальная пиковая мощность, реализуемая со стороны постоянного тока напряжением 3,3 кВ, при выполнении условий для срабатывания ДЗ с адаптацией и без нее соответственно, кВт.

Показателем, наиболее четко выражающим эффективность применения ДЗА, является $k_{\text{ДЗА}P}$. Оценить влияние коэффициента адаптации k_a на значение максимальной пиковой мощности $P'_{d\max}$ можно на основании анализа зависимостей, полученных по выражению

$$k_{\text{ДЗА}P} = f(k_a). \quad (14)$$

Процентное увеличение максимальной пиковой мощности, реализуемой со стороны постоянного тока напряжением 3,3 кВ, при применении ДЗА:

$$(k_{\text{ДЗА}P} - 1) \cdot 100 = f(k_a). \quad (15)$$

Для построения зависимостей используем рассмотренные эквивалентные сопротивления R_Θ 6-, 12- и 24-пульсовых выпрямителей. Зависимости процентного увеличения максимальной пиковой мощности, реализуемой со стороны постоянного тока напряжением 3,3 кВ, в диапазоне значений уставок срабатывания ДЗА R_y от 0,3 до 1 Ом при применении ДЗА от коэффициента адаптации k_a представлены на рис. 3.

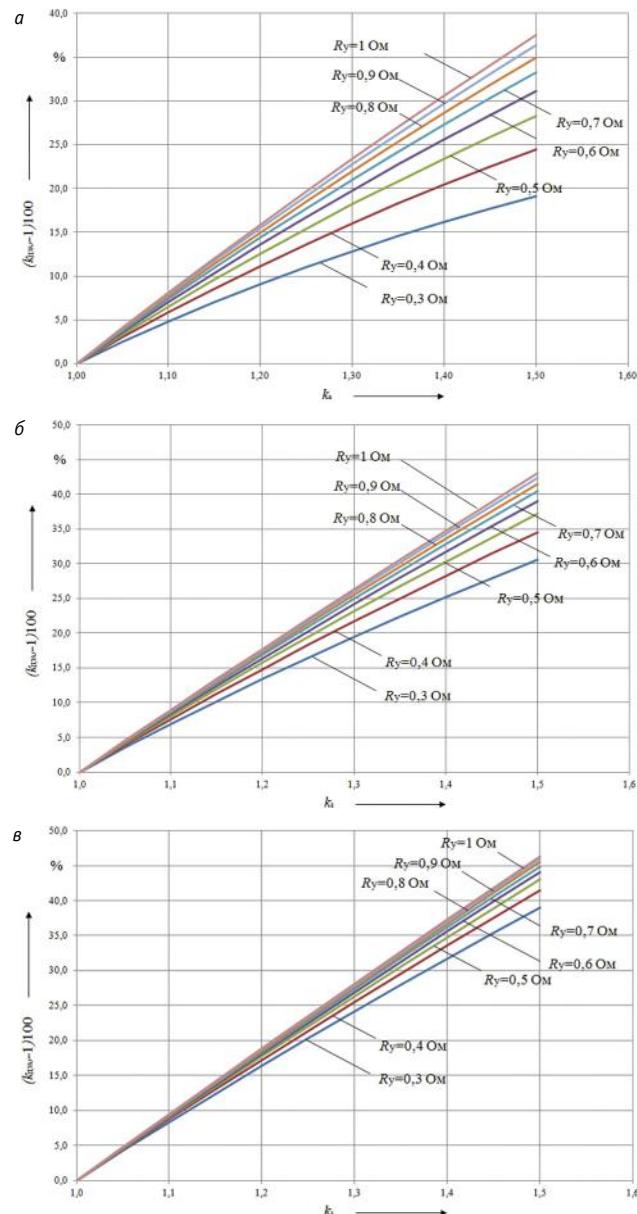


Рис. 3. Зависимости процентного увеличения максимальной пиковой мощности, реализуемой со стороны постоянного тока напряжением 3,3 кВ, при применении ДЗА от коэффициента адаптации k_a для выпрямителей:
а — шестипульсового; **б** — двенадцатипульсового;
в — двадцатичетырехпульсового

По результатам проведенных исследований и анализа зависимостей, представленных на рис. 3, введены понятия показателей эффективности ДЗА и установлено следующее:

показателем, наиболее четко выражающим эффективность ДЗА, является $k_{\text{ДЗА}P}$;

при увеличении числа пульсаций применяемого преобразовательного агрегата тяговой подстанции повышается эффективность применения ДЗА;

применение ДЗА тем эффективнее, чем выше расчетное значение уставки ДЗ R_y .



Литература

1. Голев В. А. Дистанционная защита тяговой сети постоянного тока и неселективные отключения быстродействующих выключателей // Вестник ВНИИЖТ. 1984. № 3. С. 17–21. ISSN 2223–9731.
2. Голев В. А. Анализ чувствительности токовой защиты контактной сети // Вестник ВНИИЖТ. 1986. № 6. С. 18–21. ISSN 2223–9731.
3. Преображенский В. И. Полупроводниковые выпрямители. Москва : Энергоатомиздат, 1986. 136 с.
4. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций / С. Д. Соколов, Ю. М. Бей, Я. Д. Гуральник, О. Г. Чуасов. Москва : Транспорт, 1979. 264 с.
5. Силовые преобразователи тяговых подстанций и электроподвижного состава : учебное пособие / Е. Ю. Салита, Г. С. Магай, Т. В. Комякова [и др.] ; ОмГУПС. Омск, 2011. 131 с.
6. Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи : учебник. Москва : Транспорт, 1999. 64 с.
7. Голев В. А. Новая защита тяговой сети постоянного тока // Электрическая и тепловозная тяга. 1984. № 3. С. 33–34. ISSN 0422–9274.
8. Хусаинов Е. К., Кондратьев Ю. В. Об изменении чувствительности защит контактной сети постоянного тока при адаптации к току тяговой нагрузки // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции / ОмГУПС. Омск, 2019. С. 295–302.
9. СТО РЖД 07.021.1–2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 1. Общие принципы и правила построения защит, блокировок и автоматики в системах тягового электроснабжения. Москва, 2015. 33 с.
10. СТО РЖД 07.021.2–2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 2. Методика выбора алгоритмов действия, уставок блокировок и выдержек времени автоматики в системе тягового электроснабжения. Москва, 2015. 13 с.
11. СТО РЖД 07.021.5–2018. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 5. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения постоянного тока. Москва, 2018. 107 с.

References

1. Golev V. A. Distance protection of direct current catenary and non-selective disconnections of fast-operating switches [Distantsionnaya zashchita tyagovoy seti postoyannogo toka i neselektivnye otklyucheniya bystrodeystvuyushhikh vyklyuchateley] // Vestnik VNIIZhT. 1984. No. 3. Pp. 17–21. ISSN 2223–9731.
2. Golev V. A. Analysis of sensitivity of catenary current protection [Analiz chuvstvitel'nosti tokovoy zashchity kontaktnoy seti] // Vestnik VNIIZhT. 1986. No. 6. Pp. 18–21. ISSN 2223–9731.
3. Preobrazhenskiy V. I. Semiconductor rectifiers [Poluprovodnikovye vypryamiteli]. Moscow : Energoatomizdat, 1986. 136 p.
4. 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.
5. Power convertors of traction substations and electric rolling stock [Silovye preobrazovateli tyagovykh podstantsiy i elektropodvizhnogo sostava] : textbook / E. Yu. Salita, G. S. Magay, T. V. Komyakova et al. ; OSTU. Omsk, 2011. 131 p.
6. Burkov A. T. Electronic devices and converters [Elektronnaya tekhnika i preobrazovateli] : textbook. Moscow : Transport, 1999. 64 p.
7. Golev V. A. New protection of direct current traction power supply system [Novaya zashchita tyagovoy seti postoyannogo toka] // Electric and diesel traction. 1984. № 3. P. 33–34. ISSN 0422–9274.
8. Khusainov E. K., Kondrat'ev Yu. V. On changes of sensitivity of direct current catenary protection at adaptation to traction load current [Ob izmenenii chuvstvitel'nosti zashchity kontaktnoy seti postoyannogo toka pri adaptatsii k toku tyagovoy nagruzki] // Innovative projects and technologies in education, industry and transport : proceedings of science and practice conference / OSTU. Omsk, 2019. Pp. 295–302.
9. STO RZD 07.021.4–2015. Protection of railway power supply system from short circuits and overload. Part 1. Common principles and rules of formation of protection, blocking and automation in traction power supply system [Zashchita sistem elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi ot korotkikh zamykaniy i peregruzki. Chast' 1. Obshchie printsyipy i pravila postroeniya zashchit, blokirovok i avtomatiki v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya]. Moscow, 2015. 33 p.
10. STO RZD 07.021.4–2015. Protection of railway power supply system from short circuits and overload. Part 2. Method for selection of algorithms of actions, installation of blocks and time delays of automation in traction power supply system [Zashchita sistem elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi ot korotkikh zamykaniy i peregruzki. Chast' 2. Metodika vybora algoritmov deystviya, ustavok blokirovok i vyderzhek vremeni avtomatiki v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya]. Moscow, 2015. 13 p.
11. STO RZD 07.021.4–2018. Protection of railway power supply system from short circuits and overload. Part 5. Method of protection devices selection in direct current traction power supply system [Zashchita sistem elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi ot korotkikh zamykaniy i peregruzki. Chast' 5. Metodika vybora ustavok zashchit v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka]. Moscow, 2018. 107 p.

Объем статьи 0,43 авторских листа

УДК 621.311

Владислав Леонидович Незевак, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», старший научный сотрудник научно-исследовательской части Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,
Святослав Сергеевич Самолинов, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ НА ЛИМИТИРУЮЩИХ УЧАСТКАХ

Vladislav Leonidovich Nezevak, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Supply of Railway Transport Department, Senior Researcher, Research Division, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,
Svyatoslav Sergeevich Samolinov, postgraduate student, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Application of electric power accumulators in traction power supply system in order to increase capacity on «bottleneck» sections

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы повышения пропускной способности на лимитирующих участках железных дорог постоянного тока за счет использования накопителей электроэнергии. Выбор мест размещения накопителей электроэнергии выполняется с учетом типа профиля пути участка, удельной рекуперации, преобладания вида движения, частоты остановок электроподвижного состава, режима питания межподстанционных зон. При определении энергоемкости и мощности накопителя электроэнергии учитываются глубина разряда, влияющая на ресурс работы, и график степени заряженности, зависящий от выбранной характеристики тока заряда. Порядок оценки влияния работы накопителя электроэнергии на пропускную способность рассматривается на примере одного из участков железной дороги.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, постоянный ток, лимитирующий участок, пропускная способность, накопитель электроэнергии, энергоемкость, мощность, ток заряда, глубина разряда, ресурс работы.

Summary

The paper considers issues of increasing capacity on «bottleneck» sections of direct current railways by means of application of electric power accumulators. Selection of electric power accumulators location is carried out with the consideration for grading of track on a section, specific recuperation, dominance of traffic type, rate of electric rolling stops, mode of feeding of intersubstancial zones. When determining power consumption and capacity of electric power accumulators a depth of discharge that affects a service life and a state of charge graph that depends on a selected characteristic of charging rate are considered. The procedure of assessing the influence of electric power accumulator operation on capacity is considered on the example of one of the railway sections.

Keywords: traction power supply system, direct current, «bottleneck» section, capacity, electric power accumulator, power consumption, power, charging rate, depth of discharge, service life.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-104-109

Поэтапное развитие систем тягового электроснабжения железнодорожного транспорта исторически обусловлено необходимостью в повышении пропускной и провозной способности участков железных дорог. Ограничение пропускной способности на некоторых участках связано с понижением напряжения в контактной сети до минимально допустимого уровня и ниже и возникновением дефицита мощности при увеличении массы составов. На ряде участков, где профиль пути и организация движения позволяют применять рекуперативное торможение, существуют условия по использованию в системах тягового электроснабжения накопителей электроэнергии для повышения пропускной и провозной способности, а также энергетической эффективности перевозочного процесса.

Изучению многочисленных аспектов применения накопителей электроэнергии в системах тягового электроснабжения на городском электротранспорте и метрополитене, в пригородном сообщении и на магистральных железных дорогах посвящено большое количество исследований, например [1–7].

Вместе с тем при проведении электрических расчетов пропускной способности по устройствам системы тягового электроснабжения требуется определение ряда характеристик и показателей накопителей электроэнергии: энергоемкости, степени заряженности, глубины разряда и ресурса работы.

Потенциальными участками, где можно применить накопители электроэнергии, являются лимитирующие межподстанционные зоны (МПЗ), но для решения этого вопроса необходимо выполнить сравнение таких характеристик, как тип профиля пути участка, удельная рекуперация, преобладание вида движения, частота остановок электроподвижного состава, режим питания МПЗ.



Определение характеристик профиля путем позволяет оценить потенциальную интенсивность нагрузок и рекуперативного торможения. Тип профиля оценивается по расчетному подъему участка и удельному весу легких элементов [8]. Дополнительными характеристиками профиля на рассматриваемых участках являются частота изменения направления уклонов, удельное количество монотонных участков, удельная протяженность монотонного участка средней длины.

Введение ограничений скорости на участке оказывает влияние на потенциал рекуперации и энергетические показатели системы тягового электроснабжения. В данном случае одни из характеристик будут удельное содержание количества ограничений на участке и среднее отклонение ограничений скорости движения от установленной скорости.

Присоединение накопителей к шинам тяговых подстанций и линейных устройств позволяет использовать преимущества узловых или параллельных режимов питания межподстанционных зон в нормальных условиях работы для обеспечения энергообменных процессов накопителя электроэнергии. Следует учитывать особенности схем линейных устройств и организации движения на участке.

Электрические расчеты выполняются с целью получения и сравнения результатов расчета пропускной способности на участке и энергетических показателей для вариантов размещения накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения. Перечень вариантов формируется исходя из описанных выше особенностей системы тягового электроснабжения. Для каждого варианта размещения накопителя в системе тягового электроснабжения выполняется три вида расчета.

1. Расчет показателей работы системы тягового электроснабжения при реализации заданного графика движения.

По результатам расчета должны быть определены значения токов и напряжений, полученные с интервалами 0,5, 1 или 3 мин, для подстанций, линейных устройств и накопителей электроэнергии, напряжений на токоприемниках электроподвижного состава, нагрева проводов и силового оборудования, расход и потери электроэнергии в тяговой сети и силовом оборудовании.

2. Расчет изменения межпоездных интервалов и пропускной способности участка для оценки влияния на нее мест размещения и параметров накопителей электроэнергии.

В качестве базового варианта принимается вариант расчета пропускной способности системы тягового электроснабжения без накопителей электроэнергии. Результаты базового варианта сравниваются с результатами расчетов по другим вариантам.

Расчеты по п. 1 и 2 проводятся для заданных внешних характеристик накопителей и напряжений стабилизации на шинах устройств, по достижении которых устройство переходит в один из возможных режимов работы (заряд, ожидание и разряд). Возможность реализации различных внешних характеристик и уровней напряжения для смены режимов приводит к необходимости повторных расчетов для других характеристик накопителей в местах размещения. Расчеты по п. 1 и 2 позволяют определить влияние накопителей и их параметров для заданных мест размещения на пропускную способность и оценить предварительное значение необходимой мощности

и энергоемкости, которое уточняется после проведения расчетов по мгновенным схемам с минимальным шагом расчета.

3. Расчет показателей системы тягового электроснабжения по мгновенным схемам с целью получения суточного графика нагрузки накопителя и тяговых подстанций, графика изменения напряжения.

Расчет по мгновенным схемам выполняется по заданному графику движения поездов для расчетных суток. В данном случае определению подлежат мгновенные значения токов в главной цепи накопителя электроэнергии и тяговых подстанций и напряжений на шинах 3,3 кВ с заданным шагом моделирования. В качестве заданного графика могут быть использованы различные варианты пропуска поездов повышенной массы на участке, например, по схемам «Н-с-с-с», «Н-с-Н-с», «Н-Н-Н-Н» (здесь Н — поезд наибольшей массы, с — поезд средней массы) и др.

Предварительная оценка энергоемкости и мощности выполняется для минимальной разницы между максимальным и минимальным значениями напряжения, соответствующими режимам заряда и разряда. При наличии ограничений на значение номинальной энергоемкости, например по стоимости устройства, расчеты на основе полученного графика нагрузки и изменения напряжения на шинах следует скорректировать путем расширения диапазона напряжений стабилизации в режиме ожидания накопителя электроэнергии. После указанной корректировки расчеты по определению энергетических показателей работы системы тягового электроснабжения и пропускной способности выполняются повторно.

Ресурс работы накопителя электроэнергии определяется на основе анализа эпизодичности работы устройства, позволяющего оценить среднюю продолжительность эпизода и суммарное количество эпизодов по режимам работы устройства, получить частотное распределение по продолжительности и объемам энергии [9, 10]. В соответствии с полученными данными определяются графики заряженности накопителя электроэнергии для расчетных суток, по которым в дальнейшем в зависимости от степени разряженности и количества циклов за сутки выполняется оценка ресурса работы.

Электрические расчеты для определения энергоемкости накопителя электроэнергии в системе тягового электроснабжения следует выполнять с учетом напряжений стабилизации, позволяющих переводить устройство из одного режима работы в другой. На основе возможных ограничений, накладываемых на энергоемкость, в ходе расчетов уточняются значения напряжений стабилизации и потенциальные потери энергии. Для выбранных напряжений стабилизации по результатам электрических расчетов следует построить график изменения степени заряженности накопителя с учетом коэффициента полезного действия каждого из режимов, по которым требуется определить количество потенциальных циклов заряда/разряда и глубину разряда для последующей оценки необходимого ресурса работы.

Окончательное решение о размещении накопителя электроэнергии на межподстанционных зонах участка принимается на основе сроков окупаемости. Они рассчитываются с использованием данных о доходных и расходных ставках на перевозки по участку железной дороги, стоимости системы накопления,

включающей в себя стоимость накопителей, системы управления и преобразования, затрат на эксплуатацию на всем этапе жизненного цикла.

Из-за особенностей характеристик межподстанционных зон и электротяговой нагрузки потенциальные показатели работы накопителей электроэнергии различны. Сравнение этих параметров при разных вариантах размещения и условиях работы позволяет определить диапазоны изменений энергоемкости и мощности для решения задач по повышению пропускной способности или иного класса задач, связанных с улучшением энергетических показателей системы тягового электроснабжения.

Использование накопителей электроэнергии более эффективно по сравнению с другими мероприятиями, поскольку позволяет существенно повысить пропускную способность. В качестве примера ниже приводятся результаты оценки увеличения пропускной способности при применении накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения на одной из лимитирующих межподстанционных зон Западно-Сибирской железной дороги.

Рассматриваемая межподстанционная зона расположена на равнинном профиле пути (I тип профиля, рис. 1).

Тип профиля в соответствии с классификацией определяется по удельному весу легких элементов (т.е. уклонов, находящихся в диапазоне от -3 до $+3\%$) по формуле, %:

$$\lambda = \frac{\sum l_i}{L} \cdot 100, \quad (1)$$

где l_i — протяженность i -го элемента профиля с уклоном от -3 до $+3\%$, км; L — протяженность участка расчетного полигона, км.

Режим питания межподстанционной зоны — двусторонний параллельный, реализуемый с помощью поста секционирования и пункта параллельного соединения (рис. 2). Уровень напряжения в контактной сети является лимитирующим фактором, ограничивающим пропускную способность участка. При оценке параметров накопителя электроэнергии (НЭЭ) рассматривается вариант его присоединения к шинам поста секционирования.

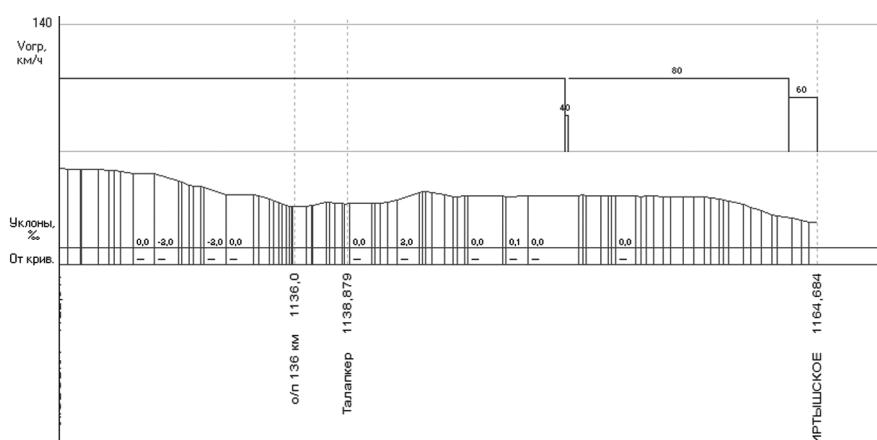


Рис. 1. Продольный профиль пути

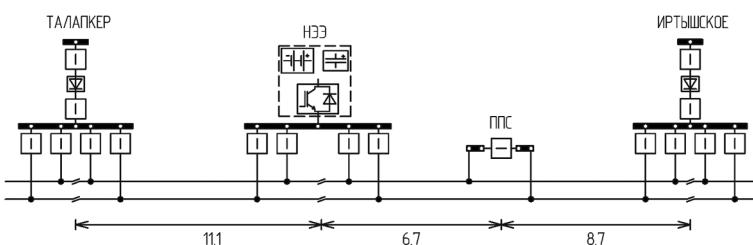


Рис. 2. Схема питания рассматриваемой межподстанционной зоны

Таблица 1

Заданные параметры для расчета наличной пропускной способности

Параметр	Данные для расчета на межподстанционной зоне
Заданный межпоездной интервал $J_{зад}$, мин	8
Схема питания	ПС, ППС — включены, резервные агрегаты — отключены
Размеры движения для параллельного графика, поездов: 1-й путь нечетный 2-й путь четный	100 100
Масса составов, т: 1-й путь нечетный $Q_{нб}$ $Q_{ср}$ 2-й путь четный $Q_{нб}$ $Q_{ср}$	9368 (1 из 4 в пакете) 6596 8368 (1 из 4 в пакете) 2612
Категория поездов, серия локомотива: 1-й путь нечетный 2-й путь четный	грузовой, 2ЭС10 грузовой, 2ЭС10
Продолжительность технологического «кокна» $T_{тех}$, мин	150

Параметры для расчета наличной пропускной способности приведены в табл. 1.

Расчетные размеры движения поездов и их массы для рассматриваемого участка приведены в табл. 2. Имитационное моделирование работы системы тягового электроснабжения для

базового варианта и варианта с размещением НЭЭ на посту секционирования позволяет оценить возможность увеличения пропускной способности на межподстанционной зоне, для рассматриваемого случая увеличение составило свыше 10 % (табл. 3).

Таблица 2

Расчетные размеры движения на участке

Вид движения	Нечетное направление			Четное направление		
	Число поездов в сутки	Масса, т	Коэффициент съема	Число поездов в сутки	Масса, т	Коэффициент съема
Пассажирское	2	—	1,77	2	—	2,30
Пригородное	3	—	1,00	3	—	1,86
Грузовое:						
наибольшей массы	18	9368	—	18	8368	—
средней массы	55	6596	—	55	2612	—
Всего (грузовое + пассажирское)	73 + 5	—	—	73 + 5	—	—

Таблица 3

Результаты расчета пропускной способности для базового и расчетного вариантов

Вариант расчета	Число грузовых поездов (неч./чет.) в сутки, ограниченное				Результирующее значение
	мощностью понижающего трансформатора	мощностью преобразовательных выпрямительных агрегатов	напряжением в контактной сети	нагревом проводов контактной сети	
Базовый (без накопителя)	206/206 (6)*	206/206 (6)	77/75 (16)	206/206 (6)	77/75 (16)
Расчетный (с накопителем)	206/206 (6)	206/206 (6)	89/89 (11)	206/206 (6)	89/89 (11)

* В скобках приведено значение минимального межпоездного интервала, мин.

Имитационное моделирование позволяет определить мгновенные значения токов и напряжений (рис. 3) для расчета энергетических показателей работы НЭЭ в режимах заряда и разряда.

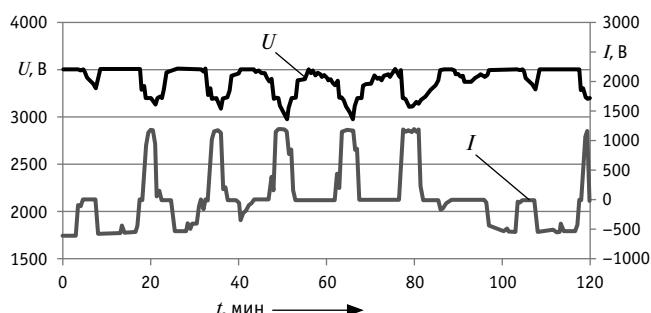


Рис. 3. График тока накопителя и напряжения на шинах поста секционирования

Условия, определяющие энергоемкость НЭЭ в системе тягового электроснабжения, — это напряжения стабилизации в режимах заряда и разряда, принятые для расчета 3500 и 3200 В. Для указанных условий получены максимальные токи НЭЭ в режимах заряда и разряда, равные соответственно 600 и 1200 А. Энергоемкость накопителя электроэнергии оценивается на уровне 1920 кВт·ч. Увеличение максимальной мощности НЭЭ в режиме разряда приводит к сокращению минимального межпоездного интервала на участке — при увеличении мощности до 4 МВт интервал сокращается до 11 мин (рис. 4).

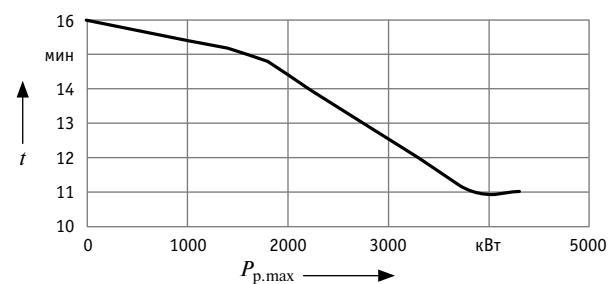


Рис. 4. График изменения межпоездных интервалов в зависимости от мощности накопителя энергии

Работа накопителя электроэнергии на шинах поста секционирования позволяет повысить уровень минимального напряжения на токоприемнике относительно уровня напряжения, наблюдаемого для базового варианта расчета, в среднем более чем на 200 В (рис. 5 и 6).

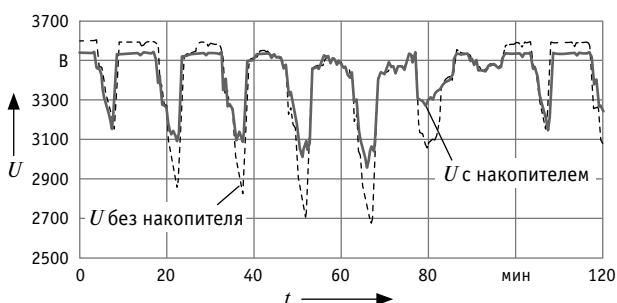


Рис. 5. Графики напряжения на шинах поста секционирования

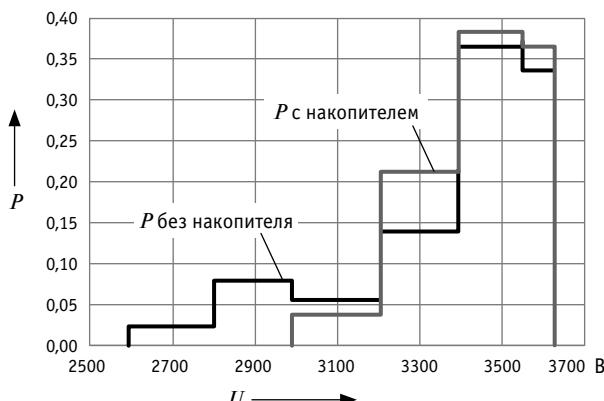


Рис. 6. Гистограмма вероятности распределения напряжения на межподстанционной зоне

При рассмотрении в качестве накопителя электроэнергии Li-ion-аккумуляторов следует учитывать условия их работы, поскольку срок службы аккумуляторов данного типа определяется глубиной разряда.

Изменение ресурса работы для Li-ion-аккумуляторов зависит от тока разряда, определяемого от номинальной емкости. В качестве примера на рис. 7 показано, что ресурс работы при снижении тока разряда Li-ion-аккумулятора с $1 C_{\text{ном}}$ до $0,25 C_{\text{ном}}$ увеличивается в 5 раз. Соответственно при определении энергоемкости Li-ion-аккумуляторов следует учитывать ток разряда. Помимо максимального тока разряда для заданных условий работы накопителя энергии необходимо оценивать степень заряженности и глубину разряда.

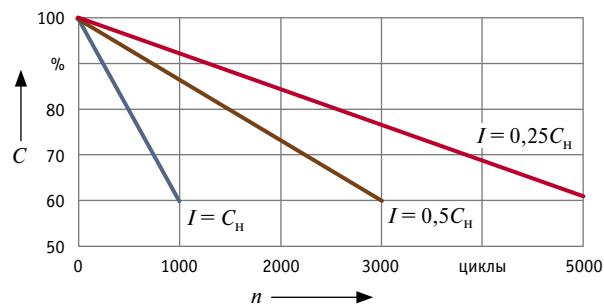


Рис. 7. График влияния энергоемкости на глубину разряда

Максимальный срок службы Li-ion-аккумуляторов наблюдается при ограничении глубины разряда до 30 %. При использовании других видов накопителей электроэнергии, например суперконденсаторов или кинетических накопителей, эти ограничения отсутствуют. Глубину разряда определяют на основе построения зависимости степени заряженности при изменении электротяговой нагрузки.

Степень заряженности накопителей электроэнергии определяется по формуле, %:

$$SOC(t) = \frac{\int_{t_0}^t i(t)u(t)dt}{W_{\text{ном}}} \cdot 100, \quad (2)$$

где $W_{\text{ном}}$ — номинальная энергоемкость накопителя электроэнергии; i , u — ток и напряжение накопителя; t_0 , t — начало и конец рассматриваемого интервала работы накопителя электроэнергии.

Для рассматриваемого участка железной дороги расчетный график степени заряженности накопителя электроэнергии на двухчасовом интервале приведен на рис. 8. Глубина разряда составляет для расчетных условий 35 % от уровня заряженности 80 %.

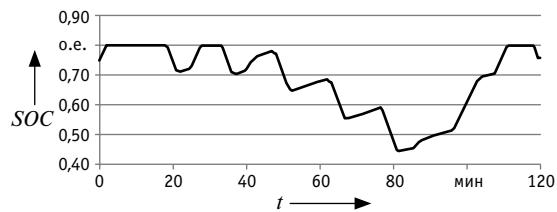


Рис. 8. График уровня заряда аккумуляторной батареи

При постоянном изменении профиля электротяговой нагрузки график степени заряженности характеризуется изменением преобладания заряда или разряда. В указанных условиях, чтобы обеспечить сохранение степени заряженности, необходимо выбрать характер изменения зарядного тока НЭЭ в диапазоне напряжений, меньших чем напряжение холостого хода смежных тяговых подстанций. Одна из возможных характеристик по определению тока заряда накопителя для обеспечения сохранения степени заряженности в заданном диапазоне напряжений приведена на рис. 9.

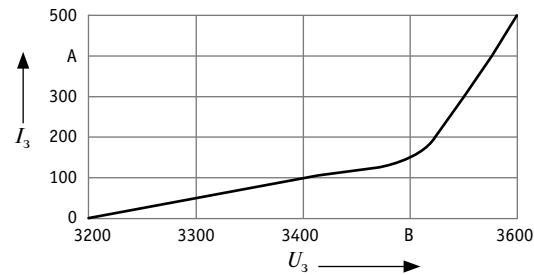


Рис. 9. Характеристика тока заряда накопителя

Расчет варианта усиления устройства электроснабжения с применением накопителей электроэнергии на лимитирующем участке показывает возможность повышения пропускной способности на 15 % (сокращение минимально допустимого межпоездного интервала для расчетных условий составляет 5 мин). При изменении условий пропуска поездов максимальный ресурс работы Li-ion-аккумуляторов в качестве накопителя электроэнергии реализуется за счет выбора: напряжений стабилизации для режимов заряда и разряда; характеристики тока заряда в диапазоне рабочих напряжений на посту секционирования; номинальной мощности и энергоемкости накопителя. Таким образом, полученные результаты позволяют рассматривать использование накопителя электроэнергии как мероприятие, способствующее повышению пропускной способности в вынужденных режимах работы системы тягового электроснабжения.



Литература

1. Radu P.V., Drazek Z. Analysis of wayside energy storage devices for DC heavy rail transport // MATEC Web of Conferences 180, 04001 (2018). DOI: 10.1051/matecconf/201818004001.
2. Battery Energy Storage for Distribution System — Case Helsinki / P. Heine, H.-P. Hellman, A. Pihkala, K. Siilin // 2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM). doi: 10.1109/PQ.2019.8818258.
3. Phayomhom A., Methapatara K., Limlek T. Energy Storage System Application in MEA Building // 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia). doi: 10.1109/gtdasia.2019.8715897.
4. Опыт пуска электроподвижного состава при помощи «накопительных» тяговых подстанций на Московском метрополитене / М. В. Шевлюгин, Д. В. Ермоленко, А. Н. Стадников, А. Е. Голицына // Электротехника. 2017. № 11. С. 75–80. ISSN 0013–5860.
5. Черемисин В.Т., Незевак В.Л., Шатохин А.П. Совершенствование системы тягового электроснабжения постоянного тока с накопителями электрической энергии на полигонах обращения тяжеловесных поездов : монография. Омск : Изд-во ОмГУПС, 2018. 282 с.
6. Nezevak V., Shatokhin A. Interaction's simulation modeling of electric rolling stock and electric traction system // 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019, Chelyabinsk, Russian Federation, 1–3 October, 2019. doi: 10.1109/uralcon.2019.8877672.
7. Tesla Powerpack. URL: <https://twitter.com/Tesla/status/1110712884286226432> (дата обращения 29.06.2019).
8. Черемисин В.Т., Незевак В.Л., Перестенко А.Е. Характеристики профилей пути на электрифицированных участках железных дорог в аспекте классификации типов // Вестник РГУПС. 2017. № 2 (66). С. 118–128. ISSN 0201–727X.
9. Незевак В.Л., Шатохин А.П. Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии // Мир транспорта. 2018. Т. 16. № 2 (75). С. 84–94. ISSN 1992–3252.
10. Незевак В.Л. Моделирование режимов работы накопителя электроэнергии на шинах поста секционирования в условиях пропуска тяжеловесных поездов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 3 (59). С. 47–57. ISSN 1813–9108.

References

1. Radu P.V., Drazek Z. Analysis of wayside energy storage devices for DC heavy rail transport // MATEC Web of Conferences 180, 04001 (2018). DOI: 10.1051/matecconf/201818004001.
2. Battery Energy Storage for Distribution System — Case Helsinki / P. Heine, H.-P. Hellman, A. Pihkala, K. Siilin // 2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM). doi: 10.1109/PQ.2019.8818258.
3. Phayomhom A., Methapatara K., Limlek T. Energy Storage System Application in MEA Building // 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia). doi: 10.1109/gtdasia.2019.8715897.
4. Experience of starting electric rolling stock with the use of «accumulative» traction substations in Moscow subway [Opty puska elektropodvizhnogo sostava pri pomoshhi «nakopitel'nykh» tyagovykh podstansiy na Moskovskom metropolitele] / M. V. Shevlyugin, D. V. Ermolenko, A. N. Stadnikov, A. E. Golitsyna // Russian Electrical Engineering. 2017. No. 11. Pp. 75–80. ISSN 0013–5860.
5. Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Shatokhin A.P. Development of direct current traction power supply system with accumulators of electric power on heavy-load trains circulation polygons [Sovershenstvovanie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka s nakopitelyami elektricheskoy energii na poligonakh obrashcheniya tyazhelovesnykh poezdov] : monograph. Omsk : Publishing House of OSTU, 2018. 282 p.
6. Nezevak V., Shatokhin A. Interaction's simulation modeling of electric rolling stock and electric traction system // 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019, Chelyabinsk, Russian Federation, 1–3 October, 2019. doi: 10.1109/uralcon.2019.8877672.
7. Tesla Powerpack. URL: <https://twitter.com/Tesla/status/1110712884286226432> (access date 29.06.2019).
8. Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Perestenko A.E. Description of tracks profiles on electrified railroad parts in the aspect of types classification [Kharakteristiki profiley puti na elektrifitsirovannykh uchastkakh zheleznykh dorog v aspekte klassifikatsii tipov] // Vestnik RGUPS. 2017. No. 2 (66). Pp. 118–128. ISSN 0201–727X.
9. Nezevak V.L., Shatokhin A.P. Features of the traction load for determining the parameters of the electric energy storage device [Kharakteristika tyagovoy nagruzki dlya opredeleniya parametrov nakopitelya elektricheskoy energii] // World of Transport and Transportation. 2018. Vol. 16. No. 2 (75). Pp. 84–94. ISSN 1992–3252.
10. Nezevak V.L. Modeling of operating modes of the electric power storage device with the busbars of a sectioning point in the conditions of handling heavy trains [Modelirovanie rezhimov raboty nakopitelya elektroenergii na shinakh posta sektsionirovaniya v usloviyakh propuska tyazhelovesnykh poezdov] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2018. No. 3 (59). Pp. 47–57. ISSN 1813–9108.

Объем статьи 0,7 авторских листа

УДК 331.452

Александр Александрович Пазуха, аспирант кафедры «Техносферная безопасность»
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ВЛИЯНИЕ ПЕРИОДОВ СУТОК НА БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ И РЕМОНТЕ УСТРОЙСТВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Alexander Alexandrovich Pazukha, postgraduate student, Technospheric Safety Department,
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Influence of day period on labour safety at maintenance and repair of catenary facilities

Аннотация

В статье исследуется влияние периодов суток на безопасность труда работников, занимающихся обслуживанием и ремонтом устройств контактной сети. Рассмотрены электротравматические случаи, произошедшие на контактной сети за 2012–2019 гг. Выполнена проверка существенности различия значений коэффициентов частоты электротравматизма в светлое время и в период вечерних гражданских сумерек, а также в темное время и в период вечерних гражданских сумерек. Для выбора принципов сравнения средних значений вычислена дисперсия указанных величин и по критерию Фишера сделана оценка существенности различий этих дисперсий. Определены дальнейшие направления исследований по влиянию периодов суток на безопасность труда работников ОАО «РЖД».

Ключевые слова: контактная сеть, электротравматизм, период суток, взвешенный коэффициент частоты, безопасность труда.

Summary

The paper investigates an influence of day period on labour safety of workers that are engaged at maintenance and repair of catenary facilities. It also considers electric traumatism occasions that took place on catenary for the period of 2012–2019. The author has carried out a verification of significance of difference between values of electric traumatism frequency coefficient in daylight time and in the period of evening civil twilight, along with in dark time and in the period of evening civil twilight. For the selection of principles of comparison of average values he has calculated variance of the considered values and with the use of Fisher criterion has carried out an assessment of the significance of difference of these variances. The author has also considered lighting systems that are used during execution of works in dark day period on railway catenary facilities. As a result, further directions of research on influence of day period on labour safety of employees of the JSC Russian Railways are determined.

Keywords: catenary, electric traumatism, day period, weighted frequency coefficient, labour safety.

DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-110-113

При производстве работ на контактной сети (КС) происходит значительно больше травматических случаев, чем в районах электроснабжения, на тяговых подстанциях, в ремонтно-ревизионных участках. Так, с 2012 по 2019 г. зарегистрировано 109 несчастных случаев при обслуживании и капитальном ремонте устройств КС, из них 30 со смертельным исходом. В том числе электротравмы составили 36 случаев, из них 23 со смертельным исходом [1].

Анализ распределения электрических случаев среди работников КС за рассматриваемый период по периодам и часам суток показал, что частота электротравматизма возрастает к 10.00, 13.00, 14.00, 16.00 ч (рис. 1).



Рис. 1. Распределение электрических случаев среди работников КС за 2012–2019 гг. по периодам и часам суток

Рабочая смена в большинстве районов контактной сети начинается в 8.00 и заканчивается в 17.00. В выходные и праздничные дни в районах контактной сети организовано дежурство на дому.

Условия освещения и видимости зависят от целого ряда природных, технических и психофизиологических факторов. При этом особое значение имеют не только сами условия освещенности, сколько скорость их изменения, как, например, при смене дня и ночи. Период суток, в течение которого проходит переход от дневного света к ночному мраку и обратно, принято называть сумерками. В зависимости от глубины

нахождения солнца за линией горизонта сумерки подразделяются на гражданские, навигационные и астрономические [2].

Гражданские сумерки, т.е. промежуток времени между восходом (заходом) солнца и моментом, когда оно взойдет (погрузится) от линии горизонта на 6° , характеризуется изменением освещенности от 650 до 3 лк. Навигационные сумерки, т.е. время, в течение которого глубина погружения (восхода) солнца от линии горизонта заключена между 6° и 12° , имеют освещенность 3–0,0058 лк [3].

Для оценки влияния условий природной освещенности на безопасность труда работников КС время суток было разделено на следующие периоды: светлое время (СВ), вечерние гражданские сумерки (ВГС), вечерние навигационные сумерки (ВНС), темное время (ТВ), утренние навигационные сумерки (УНС), утренние гражданские сумерки (УГС). Определение времени начала и окончания дня и сумерек на широте полигона железнодорожных сетей производилось по графикам (рис. 2).

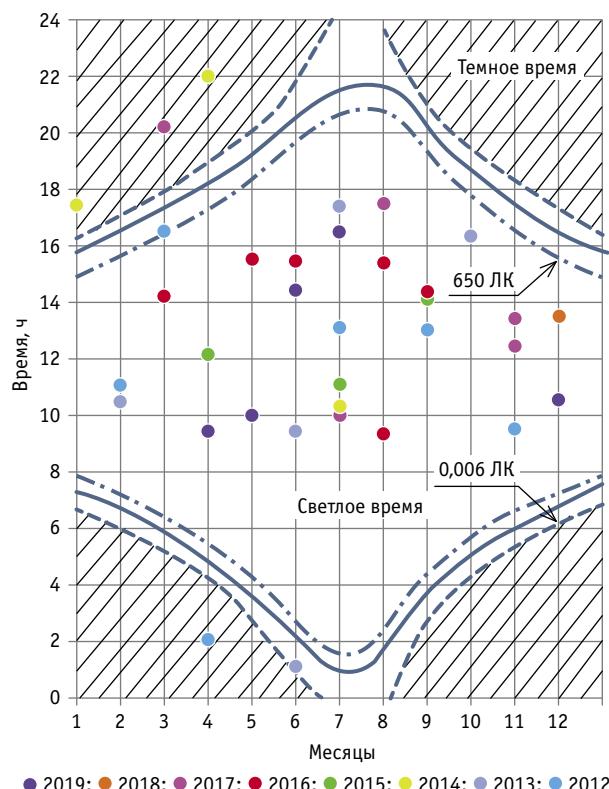


Рис. 2. График определения периода суток электрических случаев среди работников КС за 2012–2019 гг.

Чтобы оценить влияние природной освещенности на безопасность труда электромонтеров КС, следовало определить коэффициенты частоты травматизма K_j , взвешенные по продолжительности каждого выделенного периода суток. Эти коэффициенты рассчитаны по формуле

$$K_j = \frac{H_j \cdot K_{\text{q}}}{t_j}, \quad (1)$$

где H_j — доля несчастных случаев, которые произошли в j -м периоде, %; K_{q} — годовой коэффициент частоты травматизма среди работников КС; t_j — продолжительность времени j -го периода суток, %; $j = 1, 2, \dots, 6$ [3].

Годовой коэффициент частоты травматизма среди работников КС определен по выражению

$$K_{\text{q}} = \frac{T}{N_{\text{cp}}} \cdot 1000, \quad (2)$$

где T — общее число случаев травм работников за год; N_{cp} — среднесписочная численность работников предприятия в течение года [1].

Сведения о доле несчастных случаев по периодам освещенности и вычисленные значения K_j с учетом веса (относительной продолжительности времени) суточных периодов приведены соответственно в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Доля электротравм на КС в зависимости от периода освещенности

Год	Доля электротравм, %					
	Период освещенности					
	СВ	ВГС	ВНС	ТВ	УНС	УГС
2012	67	17	—	17	—	—
2013	80	—	—	—	20	—
2014	33	—	—	67	—	—
2015	100	—	—	—	—	—
2016	100	—	—	—	—	—
2017	80	—	—	20	—	—
2018	100	—	—	—	—	—
2019	100	—	—	—	—	—

Таблица 2

Взвешенный коэффициент частоты за 2012–2019 гг.

Период освещенности	$t_j, \%$	Взвешенный коэффициент частоты								\bar{K}_j
		Год								
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
СВ	51,1	0,31	0,50	0,13	0,41	0,76	0,51	0,38	0,64	0,45
ВГС	2,8	1,41	—	—	—	—	—	—	—	0,17
ВНС	4,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ТВ	34,6	0,11	—	0,40	—	—	0,19	—	—	0,09
УНС	4,2	—	1,51	—	—	—	—	—	—	0,18
УГС	2,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Следующим этапом обработки полученных данных (см. табл. 2) была проверка существенности различия значений коэффициентов частоты травматизма в светлое время $\bar{K}_{\text{СВ}}$ и в период вечерних гражданских сумерек $\bar{K}_{\text{ВГС}}$. Для выбора

принципов сравнения средних значений вычислялись дисперсии указанных величин, и по критерию Фишера оценивалась существенность различий этих дисперсий.

Дисперсию определяли по формуле

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 / n}{f}, \quad (3)$$

где $f = n - 1$ — число степеней свободы; n — объем выборки;

$\sum_{i=1}^n x_i^2$ — сумма каждого значения данных после возвведения в квадрат; $\left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2$ — квадрат суммы всех значений данных.

Дисперсия значений в светлое время составила

$$s_{\text{CB}}^2 = \frac{(0,31^2 + 0,5^2 + 0,13^2 + 0,41^2 + 0,76^2 + 0,51^2 + 0,38^2 + 0,64^2) - \frac{(0,31 + 0,5 + 0,13 + 0,41 + 0,76 + 0,51 + 0,38 + 0,64)^2}{8}}{8-1} = \frac{1,9192 - \frac{13,2552}{8}}{7} = 0,0375.$$

Дисперсия значений в вечерние гражданские сумерки

$$s_{\text{BGC}}^2 = \frac{1,41^2 - \frac{(1,41)^2}{8}}{8-1} = 0,2485.$$

Разница дисперсий по критерию Фишера составила:

$$F = \frac{s_{\text{BGC}}^2}{s_{\text{CB}}^2} = \frac{0,2485}{0,0375} = 6,6. \quad (4)$$

По табл. VII [4] при $f_1 = f_2 = 7$ степенях свободы и 5 % уровне значимости $F_{0,95}(7,7) \approx 3,8$.

Так как $F > F_{0,95}$, то дисперсии можно считать различными, и, следовательно, для сравнения средних значений \bar{K}_j возможно использовать критерий, который рассчитывается по формуле

$$T = \frac{V_1 t_{1-P/2}(f_1) - V_2 t_{1-P/2}(f_2)}{\sqrt{V_1 + V_2}}; \quad V_1 = \frac{s_{\text{BGC}}^2}{n_1}; \quad V_2 = \frac{s_{\text{CB}}^2}{n_2}, \quad (5)$$

где $t_{1-P/2}(f_1)$ — квантили распределения Стьюдента для f_1 степеней свободы; $t_{1-P/2}(f_2)$ — то же для f_2 степеней свободы.

По табл. III [4] при 5 % уровне значимости квантили распределения Стьюдента равны

$$t_{1-P/2}(f_1) = t_{1-P/2}(f_2) = t_{1-P/2}(7) = 2,37.$$

Отношения V_1 и V_2 составили:

$$V_1 = \frac{0,2485}{8} = 0,0311;$$

$$V_2 = \frac{0,0375}{8} = 0,0047.$$

После подстановки полученных значений в (5) критерий рассчитали критерий T :

$$T = \frac{0,0311 \cdot 2,37 - 0,0047 \cdot 2,37}{\sqrt{0,0311 + 0,0047}} = 0,33.$$

Гипотеза о равенстве средних ($\bar{K}_{\text{BGC}} = \bar{K}_{\text{CB}}$) отклоняется, если $|\bar{K}_{\text{BGC}} - \bar{K}_{\text{CB}}| > T$. Так как $|\bar{K}_{\text{BGC}} - \bar{K}_{\text{CB}}| = |0,17 - 0,45| = 0,28$ не превышает 0,33, следовательно, разница между средним значением коэффициента частоты травматизма в период вечерних гражданских сумерек и таким же коэффициентом в светлое время несущественна.

Аналогично выполнена проверка существенности различия значений коэффициентов частоты травматизма в темное время \bar{K}_{TB} и в период вечерних гражданских сумерек \bar{K}_{BGC} .

Дисперсия значений в темное время составила

$$s_{\text{TB}}^2 = \frac{(0,11^2 + 0,4^2 + 0,19^2) - \frac{(0,11 + 0,4 + 0,19)^2}{8}}{8-1} = 0,021.$$

Разница дисперсий по критерию Фишера:

$$F = \frac{s_{\text{BGC}}^2}{s_{\text{TB}}^2} = \frac{0,2485}{0,021} = 11,8.$$

Отношение V_2 :

$$V_2 = \frac{0,021}{8} = 0,0026.$$

Критерий T :

$$T = \frac{0,0311 \cdot 2,37 - 0,0026 \cdot 2,37}{\sqrt{0,0311 + 0,0026}} = 0,37.$$

Так как $|\bar{K}_{\text{BGC}} - \bar{K}_{\text{TB}}| = |0,17 - 0,09| = 0,08$ не превышает 0,37, разница между средним значением коэффициента частоты травматизма в период вечерних гражданских сумерек и таким же коэффициентом в темное время несущественна.

Анализ данных (см. табл. 2) показывает, что значения взвешенных коэффициентов частоты травматизма наиболее высоки в период светлого времени $\bar{K}_{\text{CB}} = 0,45$.

Таким образом, статистически установлено, что при обслуживании устройств КС наиболее травмоопасны несчастные случаи, происходящие в светлое время суток, как правило при работе в технологические «кокна», и в темное время суток при ликвидации аварийных ситуаций.

В целом по результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

взвешенные коэффициенты частоты травматизма в светлое время в 5 раз выше, чем в темное время суток, что обусловлено трудовым распорядком дня;

Литература

1. Кузнецов К.Б., Пазуха А. А. Оценка и анализ риска электротравматизма на энергетическом комплексе ОАО «РЖД» // Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи : сборник материалов V Всероссийской студенческой конференции (с международным участием). Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2019. Т. 1. С. 125–131.
2. Шаронов В. В. Таблицы для расчетов природной освещенности и видимости. Ленинград : АН СССР, 1945. 198 с.
3. Вопросы безопасности труда на железнодорожном транспорте : сборник научных трудов / Под общ. ред. О.Ф. Горнова, 1974. 174 с.
4. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений : монография. Москва : Наука, 1968. 288 с.

Объем статьи 0,3 авторских листа

подтверждается гипотеза о равенстве средних значений коэффициентов частоты травматизма в светлое время \bar{K}_{CB} , в период вечерних гражданских сумерек \bar{K}_{VGC} и в период темного времени \bar{K}_{TB} , т.е. $\bar{K}_{VGC} = \bar{K}_{CB} = \bar{K}_{TB}$:

случаи электрических травм в ночное время, как правило, связаны с ликвидацией аварийных ситуаций, поэтому для их предотвращения требуются проведение подробного анализа и разработка соответствующих организационно-технических мероприятий.

References

1. Kuznetsov K. B., Pazukha A. A. Assessment and analysis of electric traumatism risk in energy complex of the JSC Russian Railways [Otsenka i analiz risika elektrotravmatizma na energeticheskem komplekse OAO «RZhD»] // Vital activity security by the eyes of youth : proceedings of the V All-Russian conference of students (with international participation). Chelyabinsk : Publishing Center of SUSU, 2019. Vol. 1. Pp. 125–131.
2. Sharonov V. V. Tables for calculation of natural illuminance and visibility [Tablitsy dlya raschetov prirodnoy osveshhennosti i vidimosti]. Leningrad, 1945. 198 p.
3. Issues of labour safety on railway transport [Voprosy bezopasnosti truda na zheleznodorozhnom transporte] : collection of scientific papers / Ed. by O. F. Gornov, 1974. 174 p.
4. Pustylnik E. I. Statistical methods of analysis and processing of observations [Statisticheskie metody analiza i obrabotki nablyudenij] : monograph. Moscow : Science, 1968. 288 p.

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 кооперація 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>

Извещение	<p>Получатель: Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС КПП: <u>667001001</u> ИНН: <u>6670317893</u> ОКТМО: <u>65701000</u> Р/сч.: <u>40703810863010000192</u> в: ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ БИК: <u>046577795</u> К/сч.: <u>30101810900000000795</u> Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: <u>Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</u> Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2020 г.</p>
Квитанция	<p>Получатель: Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС КПП: <u>667001001</u> ИНН: <u>6670317893</u> ОКТМО: <u>65701000</u> Р/сч.: <u>40703810863010000192</u> в: ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ БИК: <u>046577795</u> К/сч.: <u>30101810900000000795</u> Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: <u>Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</u> Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2020 г.</p>

Научно-технический журнал «Транспорт Урала» DOI:10.20291/1815-9400

№ 1 (64), 2020 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 1 раз в квартал

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Почта России» — 46463

Свидетельство о регистрации средства массовой информации Роскомнадзора
ПИ № 77-18098 от 27 мая 2004 г.

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.

Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков
и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Адрес учредителя и издателя:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.

Тел. (343) 221-24-90

<http://www.usurt.ru/transporturala>

e-mail: EPupova@usurt.ru

Главный редактор:

Александр Геннадьевич Галкин

Научный редактор:

Александр Эрнстович Александров

Выпускающий редактор и корректор:

Елена Семеновна Пупова,

тел. (343) 221-24-90, 8-912-61-07-229,

e-mail: EPupova@usurt.ru

Верстка и дизайн:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Дмитрий Васильевич Поморцев

Журнал включен ВАК в перечень рецензируемых научных изданий,

в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций

на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Подписано в печать 30.03.2020 Выход в свет 07.07.2020

Тираж 250 экз. Формат 60×90/8

Цена 330 руб.

Отпечатано в соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета

в типографии ООО «Универсальная Типография «Альфа Принт».

620049, Свердловская обл., г. Екатеринбург, пер. Автоматики, д. 2ж.

Тел. 8-800-300-16-00. Сайт: www.alfaprint.ru

Заказ № 11793

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2020

