

научно-технический

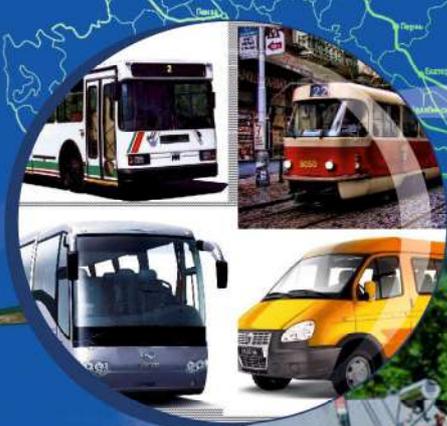
ISSN 2220-4245
журнал

ИЗВЕСТИЯ

№ 3(55)

2023

Транссиб



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. **Овчаренко Сергей Михайлович** – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
2. **Галиев Ильхам Исламович** – зам. главного редактора, советник при ректорате ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ (Омск).
3. **Шантаренко Сергей Георгиевич** – зам. главного редактора, профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
4. **Алексеев Виктор Михайлович** – профессор кафедры «Управление и защита информации» РУТа (МИИТа), д.т.н., профессор (Москва).
5. **Бессоненко Сергей Анатольевич** – заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. **Ведрученко Виктор Родионович** – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
7. **Глинка Тадеуш** – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
8. **Горюнов Владимир Николаевич** – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГУ, д.т.н., профессор (Омск).
9. **Гуда Александр Николаевич** – проректор по научной работе РГУПС, д.т.н., профессор (Ростов-на-Дону).
10. **Зыкина Анна Владимировна** – заведующая кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
11. **Исаков Александр Леонидович** – зав. кафедрой «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
12. **Ким Константин Константинович** – заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» СПбГУ, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
13. **Комяков Александр Анатольевич** – профессор кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
14. **Косарев Александр Борисович** – первый заместитель генерального директора АО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
15. **Кузнецов Андрей Альбертович** – заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
16. **Лебедев Виталий Матвеевич** – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
17. **Никитин Александр Борисович** – заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» СПбГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
18. **Лившиц Александр Валерьевич** – заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов» ИргГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
19. **Лю Цзянькунь** – доктор, профессор, заместитель декана Школы гражданского строительства университета Сунь Ятсена (Чжухай, Китай).
20. **Парамонов Александр Михайлович** – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУ, д.т.н., доцент (Омск).
21. **Сидоров Олег Алексеевич** – профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
22. **Смердин Александр Николаевич** – проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
23. **Солоненко Владимир Гельевич** – профессор кафедры «Подвижной состав» АЛТИ, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
24. **Файзибаев Шерзод Сабирович** – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ТТРУ, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
25. **Харламов Виктор Васильевич** – заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).

EDITORIAL BOARD

1. **Ovcharenko Sergey Mikhailovich** – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. **Galiev Ilkham Islamovich** – deputy chief editor, the advisor to the rector's office of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. **Shantarenko Sergey Georgievich** – deputy chief editor, professor of the department «Technologies of transport engineering and rolling stock repair» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. **Alekseev Viktor Mikhailovich** – professor of the department of Information Control and Protection of RUT, D. Sc., professor (Moscow, Russia).
5. **Bessonenko Sergey Anatolevich** – head of the department «Track Maintenance Management» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
6. **Vedruchenko Victor Rodionovich** – professor of the department «Heat-power engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
7. **Glinka Tadeusz** – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Poland).
8. **Goryunov Vladimir Nikolaevich** – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
9. **Huda Alexander Nikolaevich** – Vice-rector for scientific-work of RSTU, D. Sc., professor (Rostov-on-Don, Russia).
10. **Zykina Anna Vladimirovna** – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer science» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
11. **Isakov Alexander Leonidovich** – head of the department «Railway and Highway Surveying and Design Engineering» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
12. **Kim Konstantin Konstantinovich** – head of the department «Electrical Engineering and Heat Power Engineering» of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
13. **Komyakov Aleksandr Anatolevich** – professor of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
14. **Kosarev Alexander Borisovich** – senior deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
15. **Kuznetsov Andrey Albertovich** – head of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
16. **Lebedev Vitaliy Matveyevich** – professor of the department «Heat-power engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
17. **Nikitin Aleksandr Borisovich** – head of the department «Automation and telemechanics on railways» of PGUPS, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
18. **Livshits Alexander Valerievich** – head of the department «Automation of Production Processes» of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
19. **Liu Jiankun** – Ph. D., professor of Sun Yat-sen University, the associate dean of the School of Civil Engineering (Zhuhai, China).
20. **Paramonov Aleksandr Mikhailovich** – professor of the department «Heat-power engineering» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
21. **Sidorov Oleg Alexeevich** – professor of the department «Power supply of railway transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
22. **Smerdin Aleksandr Nikolaevich** – vice-rector by scientific work of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
23. **Solonenko Vladimir Gelyevich** – professor of the department «Rolling stock» of ALTI, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
24. **Fayzibaev Sherzod Sabirovich** – professor of the department «Wagons and wagon facilities» of TSTU, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
25. **Kharlamov Viktor Vasilyevich** – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Иванченко Владимир Иванович – ответственный секретарь, к.т.н. (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Бакланов А. А., Третинников О. В. Оценка погрешности измерения и учета расхода электроэнергии на грузовых электровозах..... 2
- Росляков А. Д., Курманова Л. С., Петухов С. А., Карпенко М. Ю. Моделирование индикаторного процесса среднеоборотного тепловозного двигателя при его работе с добавкой аммиака..... 13
- Отока А. Г., Холодильов О. В. Влияние температуры контактной среды на иммерсионный ультразвуковой контроль колесных пар вагонов при ремонте..... 24
- Галиев И. И., Минжасаров М. Х., Липунов Д. В. Анализ причин неисправностей кожуха зубчатой передачи локомотива 2ЭС6 «Синара»..... 33

Управление процессами перевозок

- Красильников П. А., Соколов М. Ю., Роменский Д. Ю. Использование данных станда-рта OpenStreetMap для задач, связанных с эксплуатацией железнодорожного транспорта..... 44
- Шугаев О. В. Определение закономерности распределения отклонений величины установленного темпа движения поездов на участке пути с автоматической системой интервального регулирования при воздействии окружающей среды и характера ведения поезда..... 54

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- Медведева Н. А., Шварцфельд В. С. Формирование и отбор вариантов топологии сети железных дорог в малоосвоенных регионах..... 66

Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

- Эргашева З. В., Баротов Ж. С., Самиев Ф. К. Совершенствование технологии обработки контейнеров в составе блок-трейна по отправлению на станции примыкания железнодорожного терминала..... 73
- Коллебер Ю. А., Мочалин С. М. Логистическая система городского пассажирского транспорта общего пользования..... 84

Энергетические системы и комплексы

- Рожидкий Д. Б., Чепиль А. В., Рыбак А. А., Галуша А. Н. О разработке методологии определения энергетического эффекта при реализации энергосервисного контракта для структурных подразделений железнодорожного транспорта..... 94
- Мятеж Т. В., Любченко В. Я., Могиленко Е. А. Исследование инверторного режима зарядных станций электромобилей на примере подстанции Театральная Новосибирской энергосистемы..... 106

Электроэнергетика

- Секретарев Ю. А., Горшунов А. А. Моделирование технического состояния электро-оборудования систем электроснабжения объектов нефтедобывающих предприятий с различными схемами питания..... 120

Электротехнические комплексы и системы

- Макаров А. С., Кузнецов А. А., Сергеев Р. В. Применение метода акустической эмис-сии для регистрации искрения в скользящем контакте электрических машин..... 131

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

- Корнев Д. А. Моделирование сетей передачи данных в интеллектуальной системе управления движением поездов..... 141

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»
Учредитель и издатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС (ОмИИТ))»
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

А. А. Бакланов¹, О. В. Третинников²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация;

²Управление Московской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», г. Москва, Российская Федерация

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ И УЧЕТА РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗАХ

Аннотация. Анализ данных показывает, что на сети железных дорог страны около 85 % от общего расхода электроэнергии на тягу поездов приходится на грузовое движение. Цель работы состоит в оценке погрешностей измерения и учета электроэнергии в грузовом движении по счетчикам электровозов и определении мер по их снижению. Используются методы: сравнительный анализ, методы интегрального исчисления, энергетического баланса и экспертных оценок.

Рассмотрены погрешности измерения расхода электроэнергии на грузовых электровозах постоянного и переменного тока, а также ошибки и погрешности на всех этапах технического учета электроэнергии по счетчикам электроподвижного состава (ЭПС). Получены зависимости максимальной относительной погрешности учета электроэнергии, обусловленные коэффициентом счетчика. Приведены соотношения и получены оценки средневзвешенной относительной погрешности измерения и учета электроэнергии в грузовом движении на отдельных этапах, а также в целом на сети железных дорог. Поскольку на некоторых этапах невозможно точно определить погрешности, использованы экспертные оценки. Даны рекомендации по снижению погрешностей и ошибок при учете электроэнергии, в том числе путем использования средств измерения (счетчиков электроэнергии, датчиков тока и напряжения) более высокого класса точности, а также полной автоматизации измерения и учета электроэнергии на ЭПС, исключая влияние человеческого фактора и случаев разрыва так называемых энергетических и временных цепочек. Определены условия, при которых возможно повысить точность измерения и учета расхода электроэнергии в грузовом движении, а также эффективность разрабатываемых мероприятий, в том числе устанавливаемых норм расхода электроэнергии на тягу поездов.

Ключевые слова: тяга поездов, расход электроэнергии, грузовой электровоз, счетчик электроэнергии, погрешность измерения и учета.

Alexander A. Baklanov¹, Oleg V. Tretinnikov²

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation;

²Management of the Moscow Railway – branch of JSC «Russian Railways», Moscow, the Russian Federation

ESTIMATION OF MEASUREMENT AND ACCOUNTING ERRORS ELECTRICITY CONSUMPTION ON ELECTRIC FREIGHT LOCOMOTIVES

Abstract. Analysis of the data shows that about 85 % of the total electricity consumption for train traction in the country's railway network falls on freight traffic. The purpose of the work is to assess the errors in measuring and accounting for electricity in freight traffic using electric locomotive meters and to determine measures to reduce them. Methods used: comparative analysis, methods of integral calculus, energy balance and expert assessments.

The errors in measuring the consumption of electricity on electric freight locomotives of direct and alternating current, as well as errors and inaccuracies at all stages of technical metering of electricity by electric rolling stock meters (EPS) are considered. The dependences of the maximum relative error of electricity metering, due to the meter coefficient, are obtained. Relationships are given and estimates are obtained for the weighted average relative error in measuring and accounting for electricity in freight traffic at individual stages, as well as in the whole on the railway network. Since at some stages it is impossible to accurately determine the errors, expert estimates were used. Recommendations are given to reduce errors and errors in electricity metering, including through the use of measuring instruments (electricity meters, current and voltage sensors) of a higher accuracy class, as well as full automation of the measurement and metering of electricity at the EPS, excluding the influence of the human factor and cases of rupture so-called energy and time chains. The conditions are determined under which it is possible to improve the accuracy of measuring and accounting for the consumption of electricity in freight traffic, as well as the effectiveness of the measures being developed, including the established norms for the consumption of electricity for train traction.

Keywords: train traction, electricity consumption, electric freight locomotive, electricity meter, measurement and accounting error.

Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2020 г. и на перспективу до 2030 г. и Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. предусматривают повышение энергетической эффективности тяги поездов. Одним из путей решения этой задачи в электрической тяге является повышение достоверности учета расхода электроэнергии на тягу, позволяющее в конечном итоге уточнить степень влияния различных факторов на энергозатраты поездов и разработать мероприятия по их минимизации. Как известно, железнодорожный транспорт является одним из крупнейших потребителей энергоресурсов, который расходует более 4 % вырабатываемой в России электроэнергии [1]. При этом основной объем потребленной электроэнергии приходится на тягу поездов в грузовом движении. Так, в 2021 г. на тягу поездов израсходовано 44,7 млрд кВт·ч, в том числе в грузовом движении 38,3 млрд кВт·ч, что составляет 85,6 % от общего расхода электроэнергии.

Как известно, на электрифицированных железных дорогах осуществляется коммерческий и технический учет электроэнергии, при этом первый из них производится на тяговых подстанциях с помощью автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ). Технический учет электроэнергии в настоящее время осуществляется на электроподвижном составе с помощью различных бортовых систем, включающих в себя и счетчики электроэнергии. Целью данной статьи является оценка погрешности технического учета электроэнергии на тягу поездов в грузовом движении.

Учет расхода электроэнергии на тягу поездов представляет собой многоэтапный процесс, при этом на каждом этапе возможно возникновение различных погрешностей и ошибок, уменьшение которых позволяет повысить достоверность конечного результата. Достоверность учета электроэнергии является ключевым фактором, от которого зависит качество анализа, планирования и нормирования расхода электроэнергии на тягу поездов [2].

Анализ процесса технического учета электроэнергии на тягу поездов показывает, что в нем можно выделить три основных этапа:

этап I – измерение электроэнергии счетчиками или автоматизированными системами управления ЭПС;

этап II – регистрация показаний счетчиков электроэнергии в бумажном или электронном маршруте машиниста либо в носителе информации автоматизированной системы управления ЭПС;

этап III – регистрация (перенос) показаний счетчиков электроэнергии из маршрута машиниста или носителя информации автоматизированной системы управления ЭПС в стационарную компьютеризированную систему обработки и хранения информации.

Здесь необходимо уточнить, что современные счетчики измеряют потребление $A_{э.потр}$ электроэнергии в режиме тяги и возврат электроэнергии $A_{э.возвр}$ в режиме рекуперативного торможения ЭПС, при этом расход электроэнергии $A_э$ равен разности между потреблением и возвратом и рассчитывается при обработке маршрута машиниста по формуле [3]:

$$A_э = A_{э.потр} - A_{э.возвр}. \quad (1)$$

При отсутствии на ЭПС рекуперативного торможения расход электроэнергии равен потреблению, т. е. $A_э = A_{э.потр}$.

Основными показателями погрешности измерения (учета) электроэнергии на тягу поездов, как известно, являются абсолютная Δ и относительная δ погрешности, характеризующиеся выражениями [4, 5]:

$$\Delta = A_{э.измер} - A_{э.истин}; \quad \delta = \frac{\Delta}{A_{э.истин}}, \quad (2)$$

где $A_{э.измер}$, $A_{э.истин}$ – соответственно измеренное и истинное количество электроэнергии.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Применительно к грузовому движению на электрифицированных участках постоянного тока в таблице 1 приведены этапы учета электроэнергии на тягу поездов, а также в зависимости от вида маршрута машиниста (носителя информации) и средства измерения представлены доли соответствующих маршрутов машиниста в общем их количестве, способы регистрации измеренной электроэнергии в маршруте машиниста или носителе информации и способ занесения информации в стационарную компьютеризированную систему. Из данных таблицы 1 видно, что в настоящее время формирование большинства маршрутов машиниста, а также регистрация электроэнергии в них производится в электронном виде, но в каждом эксплуатационном локомотивном депо имеются свои особенности.

Таблица 1 – Этапы учета расхода электроэнергии на тягу поездов

Вид маршрута машиниста (носитель информации)	Доля в общем количестве маршрутов машиниста, %	Этапы учета электроэнергии на тягу поездов		
		I	II	III
		Измерение электроэнергии счетчиками или автоматизированными системами управления ЭПС	Регистрация измеренной электроэнергии в носителе информации	Регистрация электроэнергии в компьютере, обработка и хранение информации
Маршрут машиниста на бумажном носителе (форма ТУ-3ВЦЕ, ТУ-3ВЦУ)	< 10	СКВТ-Д621, СКВТ-Ф610, СКВТ-М, БИВ4/41 (РПДА), СЭППТ-02 (АСИМ, УСАВП-Г, ИСАВП-РТ)	Ручная	Ручная
Электронный маршрут машиниста (картридж)	< 90	СКВТ-Д621, СКВТ-Ф610, СКВТ-М, БИВ4/41 (РПДА), СЭППТ-02 (АСИМ, УСАВП-Г, ИСАВП-РТ)	Ручная	Электронная
	< 50	СЭППТ-02 (АСИМ, УСАВП-Г, ИСАВП-РТ)	Электронная	Электронная

На первом этапе учета расхода электроэнергии на тягу поездов наряду с погрешностью средств измерения электроэнергии выделены следующие возможные причины, влияющие на достоверность учета электроэнергии: неисправность счетчика или системы регистрации и учета электроэнергии, некорректная работа счетчика или системы регистрации и учета электроэнергии, физическое вмешательство со стороны локомотивной бригады в исправную работу средств измерения электроэнергии, ошибка при считывании показаний счетчика.

Основные понятия и принципы измерения энергии на электровозах достаточно подробно рассмотрены в работах [3, 6], в которых показано, что погрешность измерения электроэнергии на ЭПС определяется прежде всего классом точности средств измерения: счетчиков электроэнергии, датчиков тока и напряжения. В качестве датчиков тока и напряжения для счетчиков электроэнергии на ЭПС постоянного тока используются в основном измерительные шунты и делители напряжения, а на ЭПС переменного тока – измерительные трансформаторы тока и трансформаторы напряжения либо делители напряжения.

В настоящее время на новых и прошедших модернизацию ранее выпущенных электровозах постоянного тока устанавливают электронные счетчики: СКВТ-Ф610 класса точности 1,0; СКВТ-М класса точности 1,0; БИВ4/41 класса точности 1,0 (регистратор параметров движения РПДА); СЭППТ-02 класса точности 0,2 (система информирования машиниста автономная АСИМ, универсальная система автоведения электровозов грузового движения УСАВП-Г, интеллектуальная система автоматизированного вождения поездов повышенной массы и длины с распределенной тягой ИСАВП-РТ).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Следует отметить, что электронные счетчики СКВТ-Ф610, СКВТ-М, БИВ4/41, СЭПТ-02 измеряют электроэнергию в обоих направлениях, т. е. производят измерение потребления и возврата электроэнергии на электровозах постоянного тока соответственно в режимах тяги и рекуперации. На некоторых ранее выпущенных и до сих пор эксплуатируемых электровозах установлены электромеханические счетчики СКВТ-Д600М класса точности 3,0 и СКВТ-Д621 класса точности 2,5, однако их доля незначительна.

На новых и прошедших модернизацию ранее выпущенных электровозах переменного тока устанавливаются электронные счетчики: Альфа-класса точности 0,2 и 0,5; СЭТ-1М класса точности 0,5; СЭПТ-0,4 класса точности 0,2 для активной энергии и 1,0 для реактивной энергии. На некоторых ранее выпущенных и до сих пор эксплуатируемых электровозах установлены электронные счетчики Ф440 и Ф442 класса точности 2,0, а также электромеханические счетчики СО-И442 класса точности 2,5, но их количество небольшое и продолжает сокращаться.

Необходимо отметить, что класс точности счетчика электроэнергии и других средств измерения характеризует предельную относительную погрешность измерения, выраженную в процентах [4, 5]. Предельную относительную погрешность всей системы измерения электроэнергии, включающей в себя счетчик, датчик тока и датчик напряжения, с учетом свойства аддитивности погрешности можно представить в виде среднеквадратической величины:

$$\delta_1 = \sqrt{\delta_{сч}^2 + \delta_{дт}^2 + \delta_{дн}^2}, \quad (3)$$

где $\delta_{сч}$, $\delta_{дт}$, $\delta_{дн}$ – относительные погрешности (классы точности) соответственно счетчика, датчиков тока и напряжения.

В работе [3] показано, что на электровозах постоянного тока в случае применения счетчика класса точности 1,0 с учетом точности датчиков тока и напряжения предельная относительная погрешность канала измерения электроэнергии составляет 1,1 %. На электровозе переменного тока в случае применения счетчика класса точности 2,0 с учетом трансформатора тока класса точности 0,5 и измерительного трансформатора напряжения класса точности 1,0 предельная относительная погрешность канала измерения электроэнергии составляет 2,3 %. На некоторых ранее выпущенных электровозах переменного тока, не прошедших модернизацию системы учета электроэнергии, отсутствуют измерительные трансформаторы напряжения, а напряжение на счетчики подается от обмоток собственных нужд тяговых трансформаторов, при этом погрешность системы измерения электроэнергии со счетчиками класса точности 0,5 возрастает до 5,0 %.

В последние годы проводится большая работа по повышению точности измерения электроэнергии на электровозах переменного тока путем их оснащения счетчиками более высокого класса точности и измерительными делителями напряжения типа ДНЕ-25 производства ООО «АВП Технология», имеющими класс точности 0,5. При этом погрешность системы измерения электроэнергии со счетчиками класса точности от 0,5 до 2,0 согласно формуле (3) находится в диапазоне от 0,9 до 2,3 %.

Средневзвешенная относительная погрешность измерения электроэнергии всей совокупности n счетчиков за какой-либо период времени характеризуется выражениями:

$$\delta_{1\Sigma} = \frac{\sum_{j=1}^n \delta_{1j} A_{эj}}{\sum_{j=1}^n A_{эj}} = \sum_{j=1}^n \delta_{1j} \gamma_{эj}; \quad \gamma_{эj} = \frac{A_{эj}}{\sum_{j=1}^n A_{эj}}, \quad (4)$$

где δ_{1j} – относительная погрешность измерения электроэнергии j -го счетчика;

$A_{эj}$ – электроэнергия, измеренная j -м счетчиком;

$\gamma_{эj}$ – доля электроэнергии, измеренной j -м счетчиком в общей суммарной электроэнергии, измеренной n счетчиками.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Здесь и далее под счетчиком понимается вся система измерения и учета электроэнергии на электровозе. По итогам 2021 г. на сети железных дорог ОАО «РЖД» доля электроэнергии, израсходованная грузовыми электровозами постоянного тока, составила 0,33, а электровозами переменного тока – 0,67. Учитывая изложенное выше и то, что в настоящее время подавляющее большинство грузовых электровозов переменного тока (около 80 %) оснащены делителями напряжения типа ДНЕ-25, можно принять относительную погрешность измерения электроэнергии на грузовых электровозах постоянного тока равной в среднем 1,0 %, а на электровозах переменного тока – в среднем 1,5 %. Тогда на основании формулы (4) средневзвешенная относительная погрешность измерения электроэнергии всей совокупности счетчиков грузовых электровозов составляет:

$$\delta_{1\Sigma} = 1,0 \cdot 0,33 + 1,5 \cdot 0,67 = 1,3 \%$$

Полученная оценка погрешности $\delta_{1\Sigma}$ показывает, что в настоящее время благодаря применению на электровозах переменного тока высокоточных делителей напряжения ДНЕ-25 средневзвешенная относительная погрешность измерения электроэнергии всей совокупности счетчиков грузовых электровозов уменьшилась почти в три раза по сравнению с используемым до недавних пор вариантом подключения счетчиков на электровозах переменного тока к обмоткам собственных нужд тяговых трансформаторов, при котором указанная погрешность достигала 3,7 %.

Второй этап учета расхода электроэнергии на тягу поездов начинается с регистрации измеренной электроэнергии в маршруте машиниста или носителя информации либо передачи данных электронного маршрута машиниста по беспроводным каналам связи РОРС GSM. При ручной регистрации локомотивная бригада записывает в маршрут машиниста показания счетчиков электроэнергии при приемке и сдаче, т. е. в начале и в конце поездки, по которым рассчитывается потребление или возврат электроэнергии по формуле, кВт·ч:

$$A_3 = (P_k - P_n) K_{сч}, \quad (5)$$

где P_n , P_k – соответственно показания счетчиков в начале и в конце поездки;

$K_{сч}$ – коэффициент счетчика.

При этом, как правило, возникает ошибка измерения электроэнергии, обусловленная коэффициентом счетчика, который может быть равным 1, 10, 100. Электромеханические счетчики обычно имеют коэффициент 100 или 10, электронные счетчики – 10 или 1. Примеры ошибок, обусловленных коэффициентом счетчика, показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Примеры ошибок, обусловленных коэффициентом счетчика

Коэффициент счетчика	Расшифровка маршрута машиниста	Недоучет электроэнергии, кВт·ч
1	Принял показание 11100, сдал показание 16199. Учтено $(16199 - 11100) \cdot 1 = 5099$ кВт·ч.	–
10	Принял показание 1110, сдал показание 1619. Учтено $(1619 - 1110) \cdot 10 = 5090$ кВт·ч.	9
100	Принял показание 111, сдал показание 161. Учтено $(161 - 111) \cdot 100 = 5000$ кВт·ч.	99

При снятии и записи показаний счетчика погрешность измерения, равная ошибке отсчета по последнему разряду счетного механизма, может составлять единицу в сторону увеличения либо в сторону уменьшения, т. е. максимальная абсолютная погрешность за поездку согласно формуле (5) может быть такой:

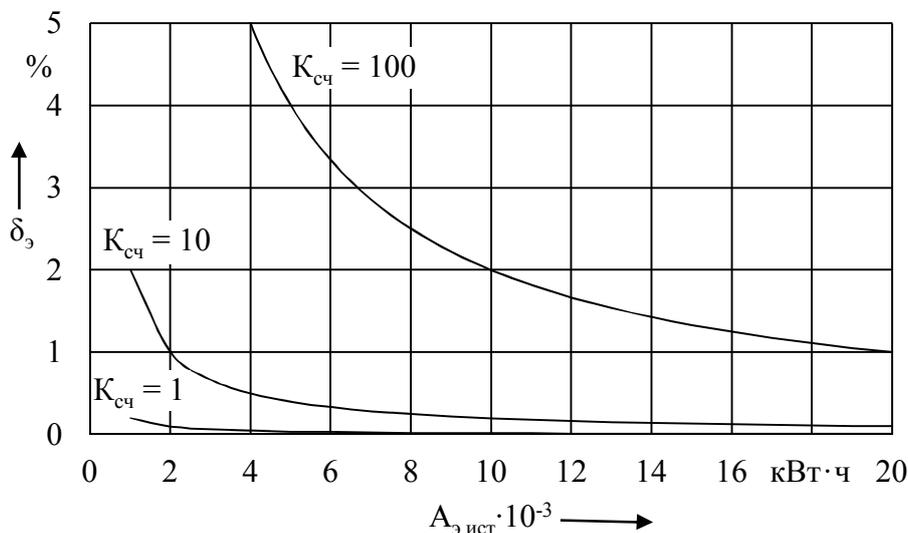
$$\Delta = 2K_{сч}. \quad (6)$$

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Максимальная относительная погрешность учета электроэнергии при этом характеризуется выражением:

$$\delta_2 = \frac{\Delta}{A_{\text{э.истин}}} = \frac{2K_{\text{сч}}}{A_{\text{э.истин}}} \quad (7)$$

По формуле (7) рассчитаны и построены на рисунке зависимости максимальной относительной погрешности измерения, обусловленной коэффициентом счетчика, от количества измеренной электроэнергии, из которых видно, что при прочих равных условиях с увеличением коэффициента счетчика погрешность измерения существенно возрастает, но при неизменном коэффициенте счетчика погрешность измерения уменьшается с увеличением количества измеренной электроэнергии. Например, при коэффициенте счетчика $K_{\text{сч}} = 10$ относительная погрешность измерения практически во всем диапазоне расхода электроэнергии существенно меньше 1 %, а при коэффициенте счетчика $K_{\text{сч}} = 1$ составляет сотые доли процента.



Максимальная относительная погрешность учета электроэнергии, обусловленная коэффициентом счетчика

Средневзвешенная относительная погрешность учета электроэнергии всей совокупности n счетчиков, обусловленная их коэффициентами, характеризуется выражением:

$$\delta_{2\Sigma} = \frac{\sum_{j=1}^n \delta_{2j} A_{эj}}{\sum_{j=1}^n A_{эj}} = \sum_{j=1}^n \delta_{2j} \gamma_{эj} \quad (8)$$

где δ_{2j} – максимальная относительная погрешность учета электроэнергии, обусловленная коэффициентом j -го счетчика.

Учитывая, что большинство счетчиков на грузовых электровозах имеют коэффициенты 1 и 10, можно считать на основании формулы (7) и рисунка, что средневзвешенная относительная погрешность учета электроэнергии всей совокупности счетчиков $\delta_{2\Sigma}$, обусловленная их коэффициентами, не превышает 1,0 %. Разумеется, при электронной регистрации измеренной электроэнергии на носителе информации погрешность $\delta_{2\Sigma}$ практически сводится к нулю. Принятая оценка погрешности $\delta_{2\Sigma} = 1,0$ % достаточно реально отражает фактическую ситуацию, поскольку часть ранее выпущенных грузовых электровозов имеют счетчики с коэффициентом 100, например, электровозы постоянного тока со счетчиками СКВТ-Д621, для которых в большом диапазоне измеренной электроэнергии за поездку (до 10000 кВт·ч) максимальная относительная погрешность учета электроэнергии,

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

обусловленная коэффициентом счетчика, существенно превышает 2 % (см. рисунок). Расход электроэнергии за поездку до 10000 кВт·ч характерен для легких поездов и многих участков, особенно с равнинным профилем пути.

При ручной регистрации показаний счетчиков в бумажном бланке маршрута машиниста формы ТУ-ЗВЦЕ и ТУ-ЗВЦУ, а также при корректировке информации в электронном маршруте машиниста (ЭММ), формируемом на основе данных, введенных машинистом через электронный терминал самообслуживания (ЭТСО), иногда возникают погрешности, связанные с так называемым «человеческим фактором». Эти погрешности обусловлены допускаемыми машинистами при вводе информации ошибками, перечисленными в таблице 3. Необходимо подчеркнуть, что такие ошибки, как правило, приводят к разрыву так называемых «энергетических цепочек», т. е. к несовпадению показаний счетчиков электроэнергии в маршрутах машинистов сдающей и принимающей локомотивных бригад.

Таблица 3 – Ошибки при вводе информации

Тип ошибки при вводе информации	Описание ошибки
Запись	Введенные слова или показатели не те, что были в оригинале
Вставка	Появление дополнительного символа (56,789 → 564,789)
В т. ч. диттография	Случайное повторение символа (56,789 → 56,7789)
Удаление	Один или несколько символов теряются (56,789 → 56,89)
В т. ч. гаплогграфия	Пропуск повторяющегося символа (56,779 → 56,79)
Перемена мест	Два символа или более меняются местами (56,789 → 56,798)

Для сокращения подобных ошибок при вводе данных целесообразно уменьшение количества этапов от генерации данных до их ввода [7]. Так, в системе АСИМ, применяемой на электровозах, после окончания поездки происходит автоматическая передача данных электронного маршрута машиниста по беспроводным каналам связи РОРС GSM в виде зашифрованных файлов. Также наряду с логическим контролем данных можно использовать добавление проверки значения каждого поля в свою электронную форму, принцип нулевой ошибки Рока-юоке, принцип Дзидока (Jidoka) и другие способы обнаружения и устранения ошибок [7].

На **третьем этапе** учета расхода электроэнергии с поступившего после поездки в центр оперативно-технического учета работы локомотивов (ЦОТУ) маршрута машиниста производится регистрация измеренной электроэнергии в компьютерной программе АРМ ЦОТУ. Операторы ЦОТУ проверяют в АРМ ЦОТУ автоматически сформированные ЭММ, заверенные электронной подписью машинистов на ЭТСО, а в случае маршрута машиниста на бумажном носителе заносят вручную данные в АРМ ЦОТУ. При этом также может проявляться «человеческий фактор», т. е. у операторов ЦОТУ, как и у локомотивной бригады, могут возникать ошибки, указанные в таблице 3, из-за которых, как правило, происходит разрыв «энергетических цепочек». В случае возникновения ошибок, связанных с разрывом или наложением «энергетических и временных цепочек», работники ЦОТУ возвращают документы в депо с указанием фактических параметров, необходимых для корректировки. После уточнения данных маршрута машиниста в ЦОТУ информация поступает для формирования различных отчетностей в автоматизированной системе централизованной обработки маршрута машиниста (ЦОММ).

Максимальная относительная погрешность учета электроэнергии, обусловленная разрывами «энергетических цепочек» счетчиков, характеризуется выражением:

$$\delta_{3\Sigma} = \frac{\sum_{j=1}^n \delta_{3j} A_{эj}}{\sum_{j=1}^n A_{эj}} = \sum_{j=1}^n \delta_{3j} \gamma_{эj}, \quad (9)$$

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

где δ_{3j} – относительная погрешность измерения электроэнергии, обусловленная разрывом «энергетической цепочки» j -го счетчика.

По итогам 2021 г. на сети дорог суммарный объем недоучтенной электроэнергии из-за разрыва «энергетических цепочек» счетчиков тяги грузовых электровозов оценивается в 1,3 %. Необходимо отметить, что учет количества разрывов «энергетических цепочек» счетчиков рекуперации с оценкой объема недоучета возвращенной электроэнергии не производится. Следовательно, оценку относительной погрешности $\delta_{3\Sigma}$, связанной с недоучетом электроэнергии из-за разрыва «энергетических цепочек» счетчиков, можно принять равной 1,3 %.

Используя погрешности измерения и учета электроэнергии на отдельных этапах, оценим средневзвешенную относительную погрешность измерения и учета электроэнергии грузовых электровозов на сети железных дорог ОАО «РЖД» в виде среднеквадратической величины:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{1\Sigma}^2 + \delta_{2\Sigma}^2 + \delta_{3\Sigma}^2} . \quad (10)$$

Подставив в формулу (10) указанные выше оценки погрешностей измерения и учета электроэнергии на отдельных этапах, получим:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{1,3^2 + 1,0^2 + 1,3^2} = 2,1 \text{ \%} .$$

Эта оценка средневзвешенной относительной погрешности измерения и учета электроэнергии свидетельствует о том, что для уменьшения погрешности учета электроэнергии в грузовом движении необходимо предусматривать различные мероприятия, прежде всего совершенствовать средства измерения электроэнергии на электровозах, а также автоматизировать систему ее учета на всех этапах [8].

Погрешность измерения и учета электроэнергии на тягу поездов зависит не только от точности средств измерения и снятия показаний счетчиков, но и от качества технического обслуживания и текущего ремонта электровозов, в том числе систем измерения и регистрации электроэнергии, и других факторов. Из-за неисправности или неправильной схемы подключения счетчик может измерить потребление (возврат) электроэнергии, значительно отличающееся от истинного потребления (возврата).

Необходимо отметить также, что при вождении поездов на участках с легким профилем пути с целью экономии электроэнергии машинисты применяют отключение части тяговых электродвигателей (ТЭД) электровоза. При этом счетчик секции электровоза с отключенными ТЭД покажет меньший расход электроэнергии за поездку или вовсе нулевой расход (показания счетчика не меняются), и если локомотивная бригада не укажет об этом в маршруте машиниста, то при его обработке в программе АРМ ЦОТУ фиксируется признак «неисправный счетчик» и учет электроэнергии производится по норме, т. е. к учету принимается расход электроэнергии, рассчитанный на основе установленных норм.

При определении расхода электроэнергии за поездку в АРМ ЦОТУ важную роль играет достоверность параметров учета в дорожной нормативно-справочной информации по топливу и электроэнергии. В случае несоответствия фактических коэффициентов счетчиков тяги и рекуперации электровоза справочным данным абсолютная погрешность может достигать больших значений и при завышенном коэффициенте счетчика рекуперации возможно получение отрицательного расхода электроэнергии за поездку. Для выделения из общего массива маршрутов с экономией (перерасходом) электроэнергии при обработке маршрутов машиниста в АРМ ЦОТУ используют коды замечаний 3; 6; 38, которые указывают работники ЦОТУ в случае наличия сообщения инженера-теплотехника или машиниста-инструктора локомотивного депо с указанием номера маршрута машиниста и кода замечания. По итогам 2021 г. на сети ОАО «РЖД» доля таких маршрутов машиниста составила 17,0 % от общего количества маршрутов машиниста.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Указанные факторы приводят к расхождению фактического расхода электроэнергии за поездку и нормы расхода, т. е. к погрешности учета электроэнергии на тягу поездов, при этом погрешность учета энергии может быть в сторону ее переучета либо недоучета. Для оценки этой погрешности необходимо знать количество недоучтенной (переучтенной) электроэнергии. Анализ показывает, что при определении экономии (перерасхода) электроэнергии за поездку в локомотивных депо максимальное отклонение фактического расхода от нормы расхода не превышает 30 %, причем в большинстве случаев такое отклонение допускают не более 10 %. Путем экспертной оценки среднее значение недоучтенной (переучтенной) электроэнергии принято равным 8 %, тогда относительная погрешность учета электроэнергии, обусловленная указанными выше признаками и кодами замечаний, для всего парка грузовых электровозов находится на таком уровне:

$$\delta_{4\Sigma} = \frac{8 \cdot 17}{100} = 1,4 \%$$

Таким образом, общая относительная погрешность измерения и учета электроэнергии на тягу грузовых поездов на всех этапах ее регистрации, в том числе при наличии счетчиков, измеряющих электроэнергию с большим расхождением по сравнению с нормой расхода, составляет:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{1\Sigma}^2 + \delta_{2\Sigma}^2 + \delta_{3\Sigma}^2 + \delta_{4\Sigma}^2} = \sqrt{1,3^2 + 1,0^2 + 1,3^2 + 1,4^2} = 2,5 \% \quad (11)$$

Здесь нужно иметь в виду, что отклонения зарегистрированного в ЦОТУ расхода от истинного расхода электроэнергии примерно с одинаковой вероятностью могут быть как в сторону ее переучета, так и в сторону недоучета, поэтому они в определенной степени взаимно компенсируются, при этом суммарный недоучет (переучет) электроэнергии сокращается и погрешность от влияния таких факторов в целом уменьшается.

Снижение погрешности измерения и учета электроэнергии на тягу поездов имеет большое значение для повышения энергоэффективности электроподвижного состава [9] и в целом перевозочного процесса.

Целесообразно разработать единые требования к применяемым в настоящее время разнотипным системам измерения и технического учета электроэнергии на грузовых и пассажирских электровозах, а также на электропоездах постоянного и переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения, поскольку утвержденные 31 декабря 2014 г. распоряжением ОАО «РЖД» «Технология учета расхода электроэнергии электроподвижным составом с использованием автоматизированных информационно-измерительных комплексов» и «Технические требования к автоматизированным информационно-измерительным комплексам учета расхода электроэнергии на тяговом электроподвижном составе» рассчитаны на перспективные системы измерения и учета расхода электроэнергии на тягу поездов и практически не отражают особенности существующей технологии технического учета электроэнергии на ЭПС, а также произошедшие за последние годы изменения, в частности, переход на безбумажную технологию учета работы локомотивных бригад в соответствии с распоряжением ОАО «РЖД» от 8 августа 2016 г. № 1594р.

Повышение точности учета электроэнергии способствует разработке действенных мероприятий по ее экономии прежде всего за счет правильной оценки степени влияния отдельных факторов на расход энергии. Нормирование расхода электроэнергии на тягу поездов в целом, эффективность устанавливаемых норм и их стимулирующее влияние для выбора энергооптимальных режимов вождения поездов во многом зависят от точности измерения и учета электроэнергии на ЭПС. При достаточно высокой точности можно осуществлять коммерческий учет электроэнергии на ЭПС, способствующий сокращению энергозатрат на тягу поездов [10]. Снижение погрешности измерения и учета электроэнергии

на тягу грузовых поездов примерно в такой же степени позволит уменьшить общесетевой годовой небаланс электроэнергии в тяге поездов.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Анализ погрешности измерения и учета расхода электроэнергии на тягу поездов на отдельных этапах показывает, что она зависит от многих факторов, в том числе от качества труда многих работников – сервиса, приемщика локомотивов, инженера и машиниста-инструктора по теплотехнике, локомотивных бригад, операторов центра оперативно-технического учета работы локомотивов.

2. Оценка относительной погрешности измерения и технического учета расхода электроэнергии на всем парке грузовых электровозов ОАО «РЖД» показывает, что она находится на уровне 2,5 %.

3. С целью дальнейшего снижения погрешности измерения и учета расхода электроэнергии на грузовых электровозах и в целом на ЭПС необходимо использовать средства измерения (счетчики электроэнергии, датчики тока и напряжения) более высокого класса точности. Повышению точности способствует полная автоматизация измерения и учета электроэнергии на ЭПС, исключая влияние «человеческого фактора» и случаев разрыва «энергетических и временных цепочек».

4. С целью уточнения погрешности измерения и учета расхода электроэнергии на тягу поездов необходимо провести детальный анализ показателей энергопотребления на всех этапах измерения и учета электроэнергии, выявить количество недоучтенной (переучтенной) энергии, связанное с разрывом «энергетических и временных цепочек», «человеческим фактором» и другими ошибками. Кроме того, целесообразно оценить и учесть погрешность измерения и учета электроэнергии на пассажирских электровозах и электропоездах.

5. Снижение погрешности измерения и учета электроэнергии позволит повысить эффективность ее использования на тягу поездов, энергоэффективность ЭПС и в целом перевозочного процесса, улучшить качество нормирования и прогнозирования энергозатрат, в определенной степени уменьшить небаланс электроэнергии в тяге поездов и сократить расход электроэнергии на тягу.

Список литературы

1. Энергосбережение на железнодорожном транспорте / В. А. Гапанович, В. Д. Авилон, Б. И. Иванов [и др.]; под ред. В. А. Гапановича. – Москва : Интехэнерго-Издат; Теплоэнергетик, 2014. – 304 с. – Текст : непосредственный.

2. Никифоров, М. М. Технология учета расхода электроэнергии электроподвижным составом с использованием информационно-измерительных комплексов и технические требования к таким комплексам / М. М. Никифоров, С. Ю. Ушаков, А. Л. Каштанов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 4 (32). – С. 101–110.

3. Бакланов, А. А. Учет электроэнергии на тягу поездов и его измерение / А. А. Бакланов. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 1996. – № 4. – С. 33–34.

4. Рабинович, С. Г. Погрешности измерений / С. Г. Рабинович. – Ленинград : Энергия, 1978. – 262 с. – Текст : непосредственный.

5. Новицкий, П. В. Оценка погрешности результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1985. – 248 с. – Текст : непосредственный.

6. Кучумов, В. А. Расход электроэнергии на тягу поездов и его измерение / В. А. Кучумов, Б. Н. Ребрик. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 1997. – № 8. – С. 28–29.

7. Аналитическая культура. От сбора данных до бизнес-результатов / Карл Андерсон / пер. с англ. Ю. Константиновой. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2017. – 336 с. – Текст : непосредственный.

8. Черемисин, В. Т. Концепция единой автоматизированной системы учета электрической энергии на тягу поездов / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, А. Л. Каштанов. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2013. – № 4 (39). – С. 83–86.

9. Черемисин, В. Т. Автоматизированный мониторинг энергетической эффективности работы электроподвижного состава ОАО «РЖД» / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, Д. В. Пашков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2014. – № 3 (42). – С. 87–91.

10. Школьников, Е. Н. Коммерческий учет электрической энергии на электроподвижном составе / Е. Н. Школьников, В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 8. – С. 50–54.

References

1. Gapanovich V.A., Avilov V.D., Ivanov B.I., et al. *Energoberezheniye na zheleznodorozhnom transporte* [Energy saving in railway transport]. Moscow, Intehjenergo-Izdat Publ.; Teplojenergetik Publ., 2014, 304 p. (In Russian).

2. Nikiforov M.M., Ushakov S.Y., Kashtanov A.L. The technology of electricity accounting on the rolling stock with the use of information-measuring complexes and technical requirements for such complexes. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 4 (32), pp. 101-110 (In Russian).

3. Baklanov A.A. Electricity metering for train traction and its measurement. *Lokomotiv – Locomotive*, 1996, no. 4, pp. 33-34 (In Russian).

4. Rabinovich S.G. *Pogreshnosti izmereniy* [Measurement errors]. Leningrad, Energiia Publ., 1978, 262 p. (In Russian).

5. Novitsky P.V., Zograf I.A. *Otsenka pogreshnosti rezul'tatov izmereniy* [Estimation of measurement results error]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1985, 248 p. (In Russian).

6. Kuchumov V.A., Rebrik B.N. Electricity consumption for train traction and its measurement. *Lokomotiv – Locomotive*, 1997, no. 8, pp. 28 -29 (In Russian).

7. Anderson Carl. *Analiticheskaya kul'tura. Ot sbora dannykh do biznes-rezul'tatov* [Analytical culture. From data collection to business results]. Moscow, Mann, Ivanov and Ferber Publ., 2017, 336 p. (In Russian).

8. Cheremisin V.T., Ushakov S.Yu., Kashtanov A.L. The concept of a unified automated system for accounting for electric energy for train traction. *Transport Urala –Transport of the Urals*, 2013, no. 4 (39), pp. 83-86 (In Russian).

9. Cheremisin V.T., Ushakov S.Yu., Pashkov D.V. Automated monitoring of the energy efficiency of the electric rolling stock of Russian Railways. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 3 (42), pp. 87-91 (In Russian).

10. Shkolnikov E.N., Cheremisin V.T., Ushakov S.Yu. Commercial metering of electric energy on electric rolling stock. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway transport*, 2016, no. 8, pp. 50-54 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бакланов Александр Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: aleksbakl@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Baklanov Alexandr Alexeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Rolling stock of electric railways», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: aleksbakl@mail.ru

Третинников Олег Владимирович

Управление Московской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

Краснопрудная ул., д. 20, г. Москва, 107996, Российская Федерация.

Инженер 1 категории отдела корпоративного управления и реализации стратегии.

Тел.: +7 (906) 795-36-20.

E-mail: olegtretinnikov@mail.ru

Tretinnikov Oleg Vladimirovich

Management of the Moscow Railway – a branch of JSC «Russian Railways».

Krasnoprudnaya st., 20, Moscow, 107996, the Russian Federation.

Engineer of the 1st category of the corporate department management and implementation of the strategy.

Phone: +7 (906) 795-36-20.

E-mail: olegtretinnikov@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Бакланов, А. А. Оценка погрешности измерения и учета расхода электроэнергии на грузовых электровозах / А. А. Бакланов, О. В. Третинников. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 3 (55). – С. 2 – 13.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Baklanov A.A., Tretinnikov O.V. Estimation of measurement and accounting errors electricity consumption on electric freight locomotives. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 3 (55), pp. 2-13 (In Russian).

УДК 621.436

А. Д. Росляков, Л. С. Курманова, С. А. Петухов, М. Ю. Карпенко

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), г. Самара, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДИКАТОРНОГО ПРОЦЕССА СРЕДНЕОБОРОТНОГО ТЕПЛОВОЗНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЕГО РАБОТЕ С ДОБАВКОЙ АММИАКА

Аннотация. В статье представлен опыт по использованию альтернативных видов топлива на тяговом автономном подвижном составе. Отечественный и зарубежный опыт по использованию аммиака показывает актуальность его использования не только для подавления вредных веществ в отработавших газах, но и как моторного топлива. Дана сравнительная характеристика параметров дизельного топлива с альтернативными, такими как аммиак и природный газ. Имеющаяся в настоящее время отработанная технология по применению природного газа позволяет воспламенять аммиак от запальной порции дизельного топлива по такому же принципу, так как он не воспламеняется от сжатия, имея высокую температуру самовоспламенения. Одним из главных преимуществ аммиака как моторного топлива служит его высокая детонационная стойкость, что позволяет увеличивать степень сжатия двигателя. На основании имеющихся преимуществ и недостатков по применению аммиака в качестве моторного топлива для обеспечения качественного воспламенения смеси аммиака и воздуха необходимо устанавливать ранний угол опережения подачи топлива. Для оценки параметров рабочего тела во впускном коллекторе при подаче аммиака выполнен термодинамический расчет. Для оценки эффективности рабочего цикла тепловозного дизеля 6ЧН 31/36 при его работе с добавкой аммиака в пропорции 50 % ДТ + 50 % NH₃ было проведено моделирование индикаторного процесса на основе газодинамической модели с помощью автоматизированной системы ENGINE. Результаты представлены в виде индикаторных диаграмм, кривых тепловыделения и температуры газов. По результатам проведенного моделирования индикаторного процесса сделан вывод о пригодности аммиака в качестве моторного топлива. Учитывая простоту производства, относительно низкую стоимость, удовлетворительные термодинамические показатели и малую токсичность отработавших газов, аммиак может рассматриваться как реальный заменитель дизельного топлива в рамках энергетики будущего.

Ключевые слова: дизель, тепловоз, аммиак, дизельное топливо, индикаторная диаграмма, внутрицилиндрические параметры.

Alexey D. Roslyakov, Leila S. Kurmanova, Sergei A. Petukhov, Mikhail Y. Karpenko

Samara State Transport University (SSTU), Samara, the Russian Federation

MODELING OF THE INDICATOR PROCESS OF A LOCOMOTIVE MEDIUM-SPEED DIESEL ENGINE WHEN IT IS OPERATED WITH THE ADDITION OF AMMONIA

Abstract. The article presents the experience of using alternative fuels on traction autonomous rolling stock. Domestic and foreign experience in the use of ammonia shows the relevance of its use not only for the suppression of

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

harmful substances in exhaust gases, but also its use as motor fuel. A comparative characteristic of diesel fuel parameters with alternative ones, such as ammonia and natural gas, is given. The currently available proven technology for the use of natural gas allows igniting ammonia from the ignition portion of diesel fuel on the same principle, since it does not ignite from compression, having a high self-ignition temperature. One of the main advantages of ammonia as a motor fuel is its high detonation resistance, which makes it possible to increase the compression ratio of the engine. Based on the existing advantages and disadvantages of using ammonia as a motor fuel, it is necessary to establish an early fuel advance angle to ensure high-quality ignition of the mixture of ammonia and air. To estimate the parameters of the working fluid in the intake manifold when supplying ammonia, a thermodynamic calculation was performed. To evaluate the efficiency of the working cycle of a diesel locomotive 6CHN 31/36 when working with an ammonia additive in the proportion of 50 % DT+50 % NH₃, an indicator process was simulated based on a gas dynamic model using an automated ENGINE system. The results are presented in the form of indicator diagrams, as well as curves of heat release and temperature of gases. Based on the results of the simulation of the indicator process, a conclusion was made about the suitability of ammonia as a motor fuel. Given the simplicity of production, relatively low cost, satisfactory thermodynamic parameters and low toxicity of exhaust gases, ammonia can be considered as a real substitute for diesel fuel in the framework of the energy of the future.

Keywords: diesel, diesel locomotive, ammonia, diesel fuel, indicator diagram, in-cylinder parameters.

В Энергетической стратегии ОАО «РЖД» от 11.02.08 № 269р поставлена задача обеспечить замещение до 25 % потребляемого дизельного топлива альтернативным к 2030 г., снижение стоимости жизненного цикла до 8,5 %, а также снижение экологической нагрузки до 95 % [1].

Актуальность проблемы поиска новых энергоносителей для транспортных энергетических установок определяется в первую очередь необходимостью строгой экономии нефтепродуктов и, во-вторых, необходимостью существенного снижения токсичности отработавших газов двигателей внутреннего сгорания.

Положительное применение альтернативных топлив приводится научными коллективами во многих научных трудах [1 – 7]. Например, в этой области много работ проведено научными коллективами АО «ВНИИЖТ», АО «ВНИКТИ». Были проведены работы по проектам для конвертирования тепловозов 2ТЭ10Г, 2ТЭ116Г, ТЭМ2Г, ЧМЭЗГ, ТЭМ18Г для работы на газодизельный цикл, которые показали положительные результаты.

За последние 20 лет российские производители железнодорожного транспорта добились существенного прогресса в развитии технологий производства локомотивов на сжиженном природном газе (рисунки 1).



Рисунок 1 – Проекты конвертирования автономных локомотивов на сжиженный природный газ [2]

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что аммиаком можно не только подавлять вредные вещества (ВВ) в отработавших газах (ОГ), но и использовать его как топливо [4 – 7]. Технология применения аммиака работоспособная, надежная, отработанная для отдельных

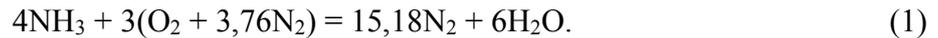
Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

транспортных средств, однако необходима адаптация при конвертировании автономных локомотивов на аммиак. Применять аммиак в качестве моторного топлива пробовали еще 70 лет назад [4].

Одним из главных преимуществ аммиака как моторного топлива служит его высокая детонационная стойкость, что позволяет увеличивать степень сжатия двигателя до 17 и выше.

Перспективность аммиака как топлива обусловлена его относительно низкой стоимостью и практически неограниченной сырьевой базой. При полном сгорании аммиака образуется только один вредный компонент – окислы азота NO_x , причем его содержание существенно меньше, чем при работе на дизельном топливе.

Горение аммиака описывается следующей формулой [8]:



Аммиак имеет значительные шансы стать элементом безуглеродной энергетики будущего, так как при его сгорании в воздухе образуются только азот и вода.

При эксплуатации тепловоза ЧМЭЗ исходя из условия обеспечения минимальных выбросов оксидов азота целесообразно заместить 50...60 % дизельного топлива аммиаком [5, 6]. Аммиак по сравнению с дизельным топливом имеет меньшую теплотворную способность, а именно 18,6 МДж/кг вместо 43,6 МДж/кг и несколько меньшую плотность – 0,77 кг/м³ вместо 0,833 кг/м³ [9, 10]. Следовательно, при замещении необходимо подавать аммиака больше, чем дизельного топлива. Из оценок следует, что на номинальном режиме работы тепловоза при замещении 50 % дизельного топлива расход аммиака должен быть 215 кг/ч вместо 92,6 кг/ч дизельного топлива.

К недостаткам аммиака можно отнести его коррозионную активность по отношению к таким цветным металлам, как медь, латунь, бронза. Это объясняется щелочными свойствами аммиака.

Аммиак необходимо воспламенять от запальной порции дизельного топлива так же, как по принципу использования природного газа, который также не воспламеняется от сжатия, имея высокую температуру самовоспламенения (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительные параметры дизельного топлива с альтернативным [9, 10]

Параметр	Топливо		
	дизельное	аммиак	природный газ
Способ хранения	В сжиженном виде	В сжиженном виде	В сжатом виде
Температура хранения, °С	27	27	27
Давление хранения, МПа	0,1	1,1	25
Низшая теплотворная способность, МДж/кг	43,3	18,8	50
Скорость ламинарного горения при $\alpha = 2$, м/с	0,35	0,07	0,38
Температура самовоспламенения, °С	310	657	568
Октановое число	45-55	130	120

Для оценки параметров рабочего тела при подаче аммиака во впускной коллектор выполнен термодинамический расчет. Термодинамический расчет может выполняться с учетом изменения свойств рабочего тела (по функциям $\pi - i$ в зависимости от T и α) [11] и без такого учета. В последнем случае газовая постоянная и показатель изоэнтропы принимаются соответственно:

– для воздуха $R = 287$ Дж/(кг · К), $k = 1,4$;

– для газа $R_r = 287,5$ Дж/(кг · К), $k_r = 1,33$.

При этом теплоемкость рабочего тела, определяют по формуле [11]:

$$c_p = \frac{k}{k-1} R, \quad (2)$$

где $c_p = 1005$ Дж/(кг · К); $c_{pr} = 1159$ Дж/(кг · К).

Работа компрессора рассчитывается на основании уравнения энергии,

$$L_k = c_p T_k^* - c_p T_v^* = H_k = i_2^* - i_1^*. \quad (3)$$

Аэродинамическое совершенство компрессора характеризуется политропическим КПД:

$$\eta_{\text{пол}} = \frac{H_{\text{пол}}}{H_{\text{пол}} + H_{\Gamma}} \cong \frac{\frac{n-1}{n}}{\frac{k-1}{k}}, \quad (4)$$

где $H_{\text{пол}}$ – политропическая работа сжатия;

H_{Γ} – работа гидравлического сопротивления.

При расчетах и экспериментах обычно используют адиабатический КПД компрессора [11]:

$$\eta_k = \frac{H_{\text{адк}}}{H_k} = \frac{H_{\text{адк}}}{H_{\text{пол}} + H_{\Gamma}} = \eta_{\text{пол}} \frac{H_{\text{адк}}}{H_{\text{пол}}}. \quad (5)$$

Здесь $H_k = i_2^* - i_1^* = \frac{H_{\text{адк}}}{\eta_k}$,

$$H_k = i_{2_{\text{ад}}}^* - i_1^* = \frac{k}{k-1} R T_1^* \left(\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right), \quad (6)$$

где $i_{2_{\text{ад}}}^*$ находим расчетом с учетом уравнения адиабаты для температуры

$$T_{2_{\text{ад}}}^* = T_1^* \pi_k^{\frac{k-1}{k}} \quad (7)$$

или применяя термодинамическую функцию $\pi(T)$:

$$\pi(T_{2_{\text{ад}}}^*) = \pi(T_1^*) \pi_k. \quad (8)$$

Далее для упрощения записи параметров опускаем знак *, который указывает на принадлежность к полному или динамическому параметру. При этом все параметры полные (динамические), а не статические.

Зависимость температуры кипения аммиака от давления приведена на рисунке 2 [10].

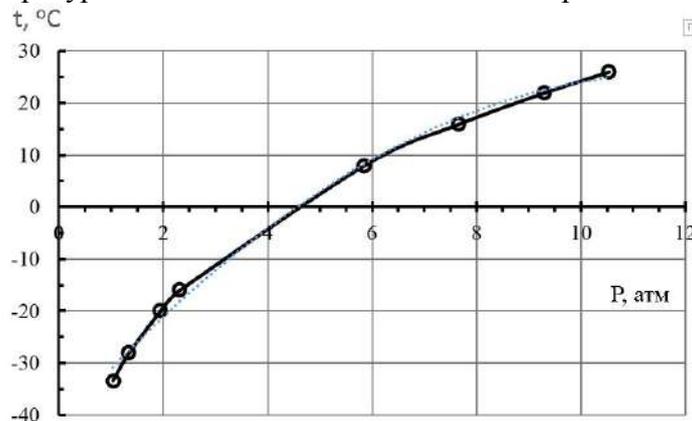


Рисунок 2 – Зависимость температуры кипения аммиака от давления

В соответствии с зависимостью температуры кипения аммиака от давления получаем, что кипение аммиака при температуре 30 °C происходит при давлении 12 атм. Давление воздуха за компрессором равно 1,5 атм. С небольшим запасом принимаем перепад давления на отверстиях подачи аммиака $\Delta P = 10 \text{ кг/см}^2$. При меньших значениях температуры воздуха за компрессором давление подачи аммиака может быть снижено.

При температуре воздуха за компрессором -30 °C и ниже подавать аммиак в дизель невозможно, так как он не испарится и будет поступать в цилиндры в жидком виде. Это приведет к образованию повышенных термических напряжений и разрушению элементов конструкции.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Для оценки возможности повышения топливной экономичности тепловозного дизеля при частичной замене дизельного топлива аммиаком выполнен анализ влияния особенностей процесса сгорания топлива на параметры рабочего тела в цилиндре дизеля, в том числе влияние степени повышения давления λ на температуру T_z и давление P_z в конце сгорания, эффективный удельный расход топлива g_e и степень предварительного расширения ψ , что учтено в автоматизированной системе ENGINE.

Схема изменения давления в процессе сгорания в дизеле приведена на рисунке 3.

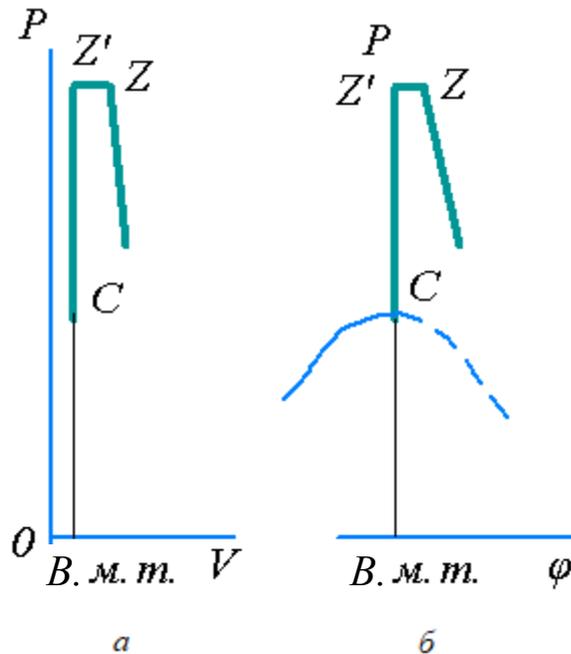


Рисунок 3 – Схема изменения давления в процессе сгорания в дизеле:
а – начальный период; б – по углу поворота коленчатого вала.

Степень повышения давления определяют из соотношения $\lambda = P_z/P_c$. Величина степени повышения давления зависит от многих факторов, в том числе:

- от конструкции камеры сгорания;
- способа смесеобразования;
- задержки воспламенения топлива;
- скорости горения топлива;
- угла опережения подачи топлива

– температуры и давления перед воспламенением топливоздушная смеси и многое другое.

Степень предварительного расширения ψ графически обозначена отрезком $Z - Z'$ (см. рисунок 3). Температуру газа T_z в конце видимого сгорания определяют на основе первого закона термодинамики:

$$dQ = (U_z - U_c) + L, \quad (9)$$

где dQ – тепло подведенное к рабочему телу в основном в результате сгорания топлива;

U_z – внутренняя энергия газов в конце видимого сгорания;

U_c – внутренняя энергия рабочего тела в конце сжатия;

L – тепловая энергия, которая идет на работу расширения.

На участке $Z - Z'$ существует конкуренция двух процессов: с одной стороны, вследствие сгорания топлива температура и давление рабочего тела увеличиваются, а с другой стороны, из-за движения поршня и увеличения объема значения этих параметров уменьшаются. В первом приближении эти процессы имеют приблизительно одинаковую интенсивность и давление остается постоянным при увеличении объема.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Существенное влияние на длительность процесса предварительного расширения оказывает скорость выгорания топлива. Из многих источников следует, что нормальная скорость распространения пламени аммиачно-воздушной смеси не превышает 0,1 м/с. Для нормально работающего двигателя величина скорости распространения пламени при сгорании дизельного топлива достигает 60 м/с.

В таблице 2 приведены результаты расчета некоторых основных параметров дизеля при сгорании дизельного топлива на номинальном режиме работы маневрового тепловоза.

Таблица 2 – Результаты расчета некоторых основных параметров при сгорании дизельного топлива на номинальном режиме работы маневрового тепловоза

λ	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5
T_z [K]	1834,5	1875,1	1915,6	1955,9	1996,1	2036,1
g_e [г/кВт · ч]	194,4	201,4	208,9	217,2	226,1	235,9
ψ	1,34	1,21	1,11	1,02	0,95	0,89
P_z [МПа]	7,74	8,77	9,81	10,84	11,87	12,9

Результаты расчета, приведенные в таблице 2, показывают, что величина степени повышения давления λ оказывает существенное влияние на температуру T_z и давление P_z в конце сгорания, а также на эффективный удельный расход топлива g_e .

На рисунке 4 приведены зависимости влияния степени повышения давления λ на температуру T_z в конце сгорания и на эффективный удельный расход топлива g_e .

Уменьшение степени повышения давления λ целесообразно, так как уменьшает удельный расход топлива и температуру рабочего тела в конце сгорания. Очевидно, что уменьшение эффективного удельного расхода топлива снижает расходы топлива при работе тепловоза. При прочих равных условий уменьшение температуры рабочего тела в конце сгорания уменьшает термические напряжения в элементах конструкции и увеличивает ресурс дизеля. При этом уменьшаются также отборы мощности на охлаждение элементов горячей части дизеля, в том числе цилиндра и поршня.

Однако использование аммиака в качестве топлива приведет к уменьшению скорости сгорания, к уменьшению степени повышения давления λ и уменьшению температуры T_z в конце сгорания, а также к увеличению площади процесса предварительного расширения ψ . Все эти изменения оказывают положительное влияние на параметры дизеля только в ограниченном диапазоне изменения скорости сгорания.

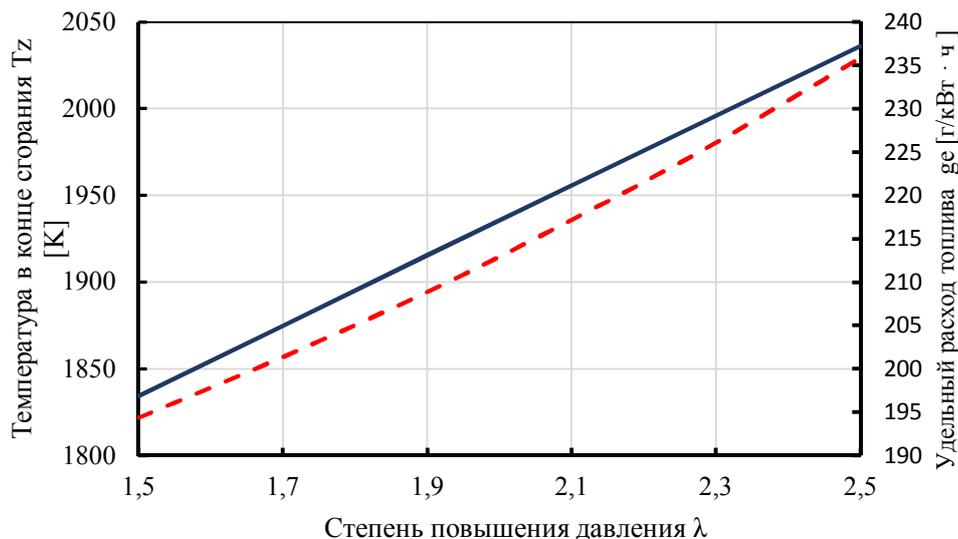


Рисунок 4 – Зависимости влияния степени повышения давления λ на температуру T_z в конце сгорания и на эффективный удельный расход топлива g_e :

— температура в конце сгорания T_z [K];
 - - - - - удельный расход топлива g_e [г/кВт · ч]

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Воспламеняемость в дизеле может быть качественно прогнозирована по величине цетанового числа топлива или количественно оценена по значению периода задержки воспламенения. Цетановое число дизельного топлива равно 45...55. Характерными особенностями использования аммиака являются низкий стехиометрический коэффициент (6,1 кг/кг), высокая температура воспламенения аммиачно-воздушных смесей (650 °С) и их «вялое» сгорание. Последнее обусловлено низкой температурой «аммиачного» пламени (1956 К по сравнению с 2336 К для дизельного топлива), в связи с чем самоускорение реакций горения замедляется. Цетановое число аммиака близко к нулю, в то же время аммиак отличается высокой детонационной стойкостью: его октановое число составляет по моторному 110 и 130 по исследовательскому методам.

Различными исследователями предложено большое количество уравнений, пригодных лишь для одного конкретного типа двигателя или вида топлива. Однако для смеси дизельного топлива и аммиака такие работы практически не выполнялись.

Необходимо проводить экспериментальные испытания по отработке программы регулирования подачи топлива, в том числе отработки оптимального угла опережения подачи топлива.

Доля оптимального замещения дизельного топлива аммиаком на каждом конкретном режиме работы дизельного двигателя и с учетом температуры воздуха за компрессором должна определяться путем расчетных оценок с учетом ограничений, приведенных выше.

Во всех случаях для обеспечения качественного воспламенения смеси аммиака и воздуха требуется ранний угол опережения подачи топлива (УОП, град. ПКВ).

В качестве объекта исследования выбран дизель 6ЧН 31/36 маневрового тепловоза ЧМЭЗ, так как его характеристики наиболее исследованы. Его характеристики приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики двигателя 6ЧН31/36

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Число цилиндров, расположение	6Р
2	Рабочий объем цилиндра, л	27,2
3	Диаметр цилиндра, мм	310
4	Ход поршня, мм	360
5	Степень сжатия	13

Для оценки эффективности рабочего цикла тепловозного дизеля 6ЧН 31/36 при его работе с добавкой аммиака в пропорции 50 % ДТ + 50 % NH₃ было проведено моделирование индикаторного процесса на основе газодинамической модели с помощью автоматизированной системы ENGINE, результаты расчетов по которой достаточно хорошо совпадают с результатами экспериментальных испытаний [11].

Моделирование проведено для четырех значений степени сжатия ϵ : 13, 14, 15 и 16.

Для моделирования выбраны параметры работы двигателя 6ЧН 31/36, представленные в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры моделирования

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	750
2	Коэффициент избытка воздуха	2
3	Начальное давление в цилиндре, МПа	1,3
4	Начальная температура, °С	333
5	УОП, град. ПКВ	-20

На рисунке 5 приведено окно рабочей программы ENGINE с вводом основных технических характеристик двигателя 6ЧН 31/36 для расчетной оценки параметров рабочего цикла.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

ENGINE - информационно-математическая модель рабочего цикла ДВС v. 1.3 W95

Файл Окно С программы Выход

Условия газодинамического расчета параметров ДВС

КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДВИГАТЕЛЯ:

Тактность $i = 4$ Число цилиндров $N = 6$ Объем КС $V = 27200$ ДП $D = 31$

Частота $\omega = 750$ Степень сжатия $\epsilon = 13$ РКХП $\gamma = 0,25$

ХАРАКТЕРИСТИКИ МОТОРНОГО ТОПЛИВА:

Вид топлива: 50ДТ+50NH₃ Агрегатное состояние: смесь Теплотворность: 16355 Дж/г

Состав топлива, массовых %: С 43,2 Н 15,5 О 0 N 41,3 S 0 Ph 0 A 0 W 0

ПАРАМЕТРЫ РАБОЧЕГО ЦИКЛА:

Начальное давление $P_0 = 1,3$ Начальная температура $T_0 = 317$ ТКС $T_w = 550$

КИБ $\alpha = 2$ ДРК $\lambda = 50$ МНВ $\phi_m = 15$ ДВ $\Delta \tau = 20$

Модель горения:
 Газодинамическая
 Химкинетическая

Копировать форму в файл

<< Вернуться Рассчитать >>

Рисунок 5 – Форма ввода данных для газодинамического расчета в программе ENGINE при работе двигателя 6ЧН 31/36 на дизельном топливе с добавкой аммиака (50 % ДТ + 50 % NH₃)

Результаты моделирования приведены в виде индикаторных диаграмм на рисунке 3 и показателей рабочего цикла, приведенных в таблице 5.

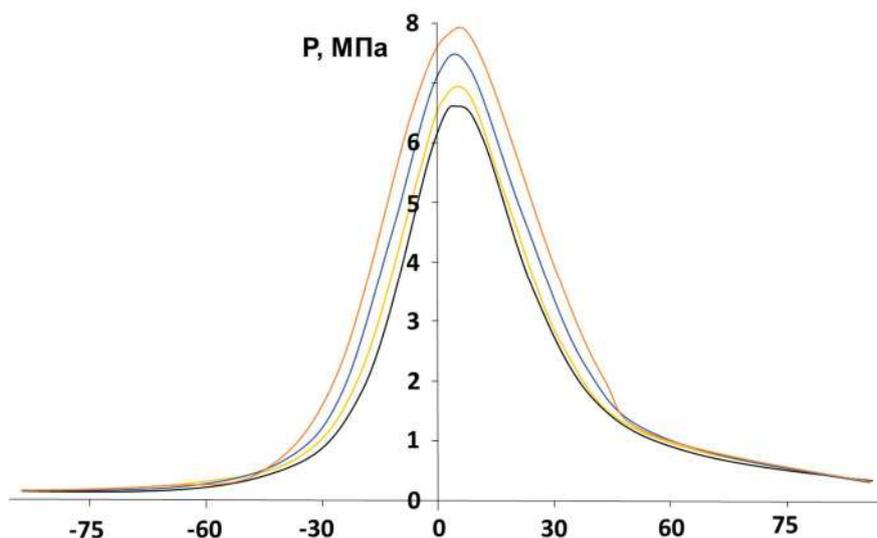


Рисунок 6 – Индикаторные диаграммы двигателя 6ЧН 31/36 при его работе на дизельном топливе с добавкой аммиака:

— ДТ, $\epsilon = 13$; — 50 % ДТ + 50 % NH₃, $\epsilon = 14$;
 — 50 % ДТ + 50 % NH₃, $\epsilon = 15$; — 50 % ДТ + 50 % NH₃, $\epsilon = 16$

Таблица 5 – Показатели рабочего цикла дизеля 6ЧН 31/36 при его работе на дизельном топливе с добавкой аммиака (50 % ДТ + 50 % NH₃)

Наименование параметра	ДТ	50 % ДТ + 50 % NH ₃			
		Степень сжатия			
		$\epsilon = 13$	$\epsilon = 14$	$\epsilon = 15$	$\epsilon = 16$
Среднее индикаторное давление $P_{инд}$, МПа	1,07	1,12	1,16	1,21	
Эффективная мощность N_e , кВт	930	739,7	751,5	760	
Удельный расход топлива г/кВт · ч	226	260,8	257,3	253,4	
Тепловой КПД η	25	28	28	28,1	
Максимальное давление сгорания P_{max} , МПа	70	74,4	78,8	81,2	
Максимальная температура рабочего цикла T_{max} , К	1710	1736	1740	1742	

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

На рисунке 7 представлены кривые тепловыделения и температуры газов.

Как видно, при подаче аммиака значительное влияние на процесс горения в цилиндрах двигателя оказывают запальная порция ДТ и повышение степени сжатия.

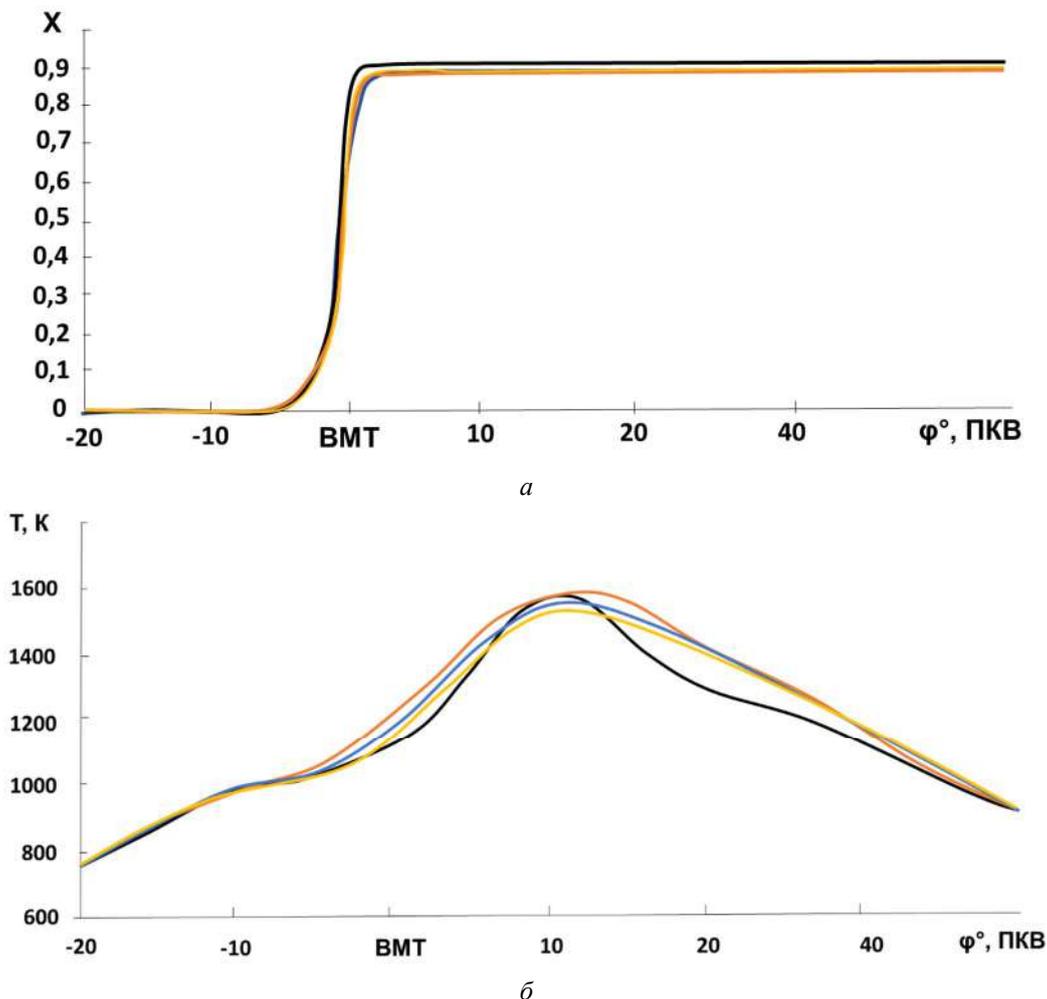


Рисунок 7 – Кривые тепловыделения (а) и температуры газов (б) при работе двигателя 6ЧН 31/36 при его работе на дизельном топливе с добавкой аммиака:

— ДТ, $\epsilon = 13$; — 50 % ДТ + 50 % NH_3 , $\epsilon = 14$;
— 50 % ДТ + 50 % NH_3 , $\epsilon = 15$; — 50 % ДТ + 50 % NH_3 , $\epsilon = 16$

По результатам моделирования индикаторного процесса можно сделать вывод о пригодности аммиака в качестве моторного топлива. При одинаковых режимных параметрах и степени сжатия мощность дизельного двигателя с добавкой 50 % NH_3 повышается на 5 %. Увеличение степени сжатия до 16 с добавкой аммиака дает небольшой прирост мощности, приблизительно 4 % при снижении удельного расхода топлива на 10 %.

Таким образом, к научной новизне в работе относятся результаты теоретической проработки возможности повышения топливной экономичности дизеля до 10 % при частичной замене дизельного топлива аммиаком.

Учитывая простоту производства, относительно низкую стоимость, удовлетворительные термодинамические показатели и малую токсичность отработавших газов, аммиак может рассматриваться как реальный заменитель бензина и дизельного топлива в рамках энергетики будущего.

В 2023 г. в г. Тольятти в Самарской области можно приобрести аммиак безводный сжиженный ГОСТ 6221–90 оптом по 20 000 руб. за тонну, а дизельное топливо – по 52 000... 62 000 руб. за тонну.

Список литературы

1. Асабин, В. В. Расчет эффективных показателей среднеоборотного тепловозного дизеля, работающего по газодизельному циклу / В. В. Асабин, Л. С. Курманова, С. А. Петухов [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2021. – № 5 (89). – С. 50–56.
2. Информационно-справочный материал о существующих технических решениях применения СПГ для железнодорожного транспорта. – Текст : электронный // gazprom.ru : сайт. – URL: <https://international.gazprom.ru/> (дата обращения: 19.06.2023).
3. Петухов, С. А. Ресурсосбережение и энергоэффективность тепловозных двигателей : монография / С. А. Петухов, В. Е. Лазарев, В. В. Асабин [и др.]. – Самара : Самарский государственный университет путей сообщения, 2020. – 138 с. – Текст : непосредственный.
4. Климентьев, А. Ю. Аммиак – перспективное моторное топливо для безуглеродной экономики / А. Ю. Климентьев, А. А. Климентьева. – Текст : непосредственный // Транспорт на альтернативном топливе. – 2017. – № 3 (57). – С. 32–44.
5. Ковалев, Л. Г. Возможности использования аммиака – носителя водорода в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания / Л. Г. Ковалев, С. В. Захаров. – Текст : непосредственный // Вестник КрасГАУ. – 2007. – № 4. – С. 158–163.
6. Нейжмак, М. Р. Использование аммиака в качестве топлива для судов с целью снижения выбросов диоксида углерода в атмосферу / М. Р. Нейжмак, А. И. Епихин, М. А. Модина. – Текст : непосредственный // Эксплуатация морского транспорта. – 2021. – № 4 (101). – С. 131–137.
7. Чалкин, В. Н. Применение аммиака в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания / В. Н. Чалкин, А. П. Марченков. – Текст : непосредственный // Дорожно-транспортный комплекс: состояние, проблемы и перспективы развития : сб. науч. тр. / Волжский филиал МАДИ. – Чебоксары, 2016. – С. 310–315.
8. Ammonia – a fuel for motor buses, Emeric Kroch D.Sc. *Journal of the Institute of Petroleum*, 1945.
9. Голубев И.Ф. Теплофизические свойства аммиака / И. Ф. Голубев, В. П. Кияшова. – Москва : Изд-во стандартов, 1978. – 264 с. – Текст : непосредственный.
10. Дорофеев, В. М. Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок / В. М. Дорофеев, В. Г. Маслов, Н. В. Первышин. – Москва : Машиностроение, 1973. – 144 с. – Текст : непосредственный.
11. Булыгин, Ю. И. Экспериментальное и компьютерное исследование рабочего процесса и токсичности тепловозных двигателей внутреннего сгорания / Ю. И. Булыгин. – Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2006. – 145 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Asabin V.V., Kurmanova L.S., Petukhov S.A. et al. Calculation of effective indicators of an average-speed diesel locomotive operating on a gas-diesel cycle. *Vestnik transporta Povolzhya – Bulletin of transport of the Volga region*, 2021, no. 5 (89), pp. 50-56 (In Russian).
2. *Informacionno_spravocnii material o suschestvuyuschih tehnikeskikh resheniyah primeneniya SPG dlya jeleznodorojnogo transporta* [Information and reference material on existing technical solutions for the use of LNG for railway transport]. Available at: <https://international.gazprom.ru/> (accessed 19.06.2023).
3. Petukhov S.A., Lazarev V.E., Asabin V.V. et al. *Resursosberejenie i energoeffektivnost teplovoznih dvigatelei: monografiia* [Resource conservation and energy efficiency of diesel engines: monograph]. Samara: Samara State Transport University Publ., 2020, 138 p. (In Russian).

4. Klimentyev A.Yu., Klimentyeva A.A. Ammonia is a promising motor fuel for a carbon-free economy. *Transport na al'ternativnom toplive – Alternative Fuel Transport*, 2017, no. 3 (57), pp. 32-44 (In Russian).

5. Kovalev L.G., Zakharov S.V. Possibilities of using ammonia – carrier of hydrogen as fuel for internal combustion engines. *Vestnik KrasGAU – The Bulletin of KrasGAU*, 2007, no. 4, pp. 158-163 (In Russian).

6. Neizhmak M.R., Epikhin A.I., Modina M.A. The use of ammonia as fuel for ships in order to reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere. *Ekspluatatsiia morskogo transporta – Operation of marine Transport*, 2021, no. 4 (101), pp. 131-137 (In Russian).

7. Chalkin V.N., Marchenkov A.P. [The use of ammonia as fuel for internal combustion engines]. *Dorozhno-transportnyi kompleks: sostoianie, problemy i perspektivy razvitiia: sbornik nauchnykh trudov* [Road transport complex: state, problems and prospects of development: collection of scientific papers]. Cheboksary, 2016, pp. 310-315 (In Russian).

8. Ammonia – a fuel for motor buses, Emeric Kroch D.Sc. *Journal of the Institute of Petroleum*, 1945.

9. Golubev I.F., Kiyashova V.P. *Teplofizicheskie svoistva ammiaka* [Thermophysical properties of ammonia]. M.: Publishing House of Standards, 1978, 264 p. (In Russian).

10. Dorofeev V.M., Maslov V.G., Pervyshin N.V. *Termogazodinamicheskii raschet gazoturbinnih silovih ustanovok* [Thermogasodynamic calculation of gas turbine power plants]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1973, 144 p. (In Russian).

11. Bulygin Yu.I. *Eksperimentalnoe i kompyuternoe issledovanie rabocheho processa i toksichnosti teplovoznih dvigatelei vnutrennego sgoraniya* [Experimental and computer study of the workflow and toxicity of diesel internal combustion engines]. Rostov-on-Don, Don State Technical University Publ., 2006, 145 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Росляков Алексей Дмитриевич

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

Свободы ул., д. 2 в, г. Самара, 443066, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Тяговый подвижной состав», СамГУПС.

Тел.: +7 (846) 255-68-58.

E-mail: roslykov_ad@mail.ru

Курманова Лейла Салимовна

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

Свободы ул., д. 2 в, г. Самара, 443066, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав», СамГУПС.

Тел.: +7 (846) 255-68-58.

E-mail: leyla_kurmanova@mail.ru

Петухов Сергей Александрович

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

Свободы ул., д. 2 в, г. Самара, 443066, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав», СамГУПС.

Тел.: +7 (846) 255-68-58.

E-mail: sakmara-cite@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Roslyakov Alexey Dmitrievich

Samara State Transport University (SSTU).

2 v, Svoboda st., 443066 Samara, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Traction rolling stock», SSTU.

Phone: +7 (846) 255-68-58.

E-mail: roslykov_ad@mail.ru

Kurmanova Leila Salimovna

Samara State Transport University (SSTU).

2 v, Svoboda st., 443066 Samara, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Traction rolling stock», SSTU.

Phone: +7 (846) 255-68-58.

E-mail: leyla_kurmanova@mail.ru

Petukhov Sergei Aleksandrovich

Samara State Transport University (SSTU).

2 v, Svoboda st., 443066 Samara, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Traction rolling stock», SSTU.

Phone: +7 (846) 255-68-58.

E-mail: sakmara-cite@mail.ru

Карпенко Михаил Юрьевич

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

Свободы ул., д. 2 в, г. Самара, 443066, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Тяговый подвижной состав», СамГУПС.

Тел.: +7 (846) 255-68-58.

E-mail: lokosss1@mail.ru

Karpenko Mikhail Yurievich

Samara State Transport University (SSTU).

2 v, Svoboda st., 443066 Samara, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Traction rolling stock», SSTU.

Phone: +7 (846) 255-68-58.

E-mail: lokosss1@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Моделирование индикаторного процесса среднеоборотного тепловозного двигателя при его работе с добавкой аммиака / А. Д. Росляков, Л. С. Курманова, С. А. Петухов, М. Ю. Карпенко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 3 (55). – С. 13 – 24.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Roslyakov A.D., Kurmanova L.S., Petukhov S.A., Karpenko M.Yu. Modeling of the indicator process of a locomotive medium-speed diesel engine when it is operated with the addition of ammonia. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 3 (55), pp. 13-24 (In Russian).

УДК 629.4.027.5:620.179.162

А. Г. Отока¹, О. В. Холодилов²

¹Гомельское вагонное депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги», г. Гомель, Республика Беларусь;

²Белорусский государственный университет транспорта (УО «БелГУТ»), г. Гомель, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КОНТАКТНОЙ СРЕДЫ НА ИММЕРСИОННЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ КОЛЕСНЫХ ПАР ВАГОНОВ ПРИ РЕМОНТЕ

Аннотация. В соответствии с техническими нормативными правовыми актами по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар грузовых и пассажирских вагонов одним из распространенных методов, которым проверяют ось и цельнокатаные колеса на наличие внутренних, раскрытых по глубине поверхностных дефектов, является ультразвуковой. На ремонтных предприятиях вагонного хозяйства железных дорог, в том числе на заводах-изготовителях деталей и составных частей колесных пар, на практике применяют контактный или иммерсионный ввод ультразвука в контролируемый материал. В зависимости от утвержденной документации на объект и метод контроля, наличия специализированного оборудования неразрушающего контроля предприятия отдают предпочтение тому или иному способу. Известно, что влияние температуры окружающей среды сказывается непосредственно на чувствительности ультразвукового контроля. Сегодня на Белорусской железной дороге пользуется популярностью иммерсионный ввод ультразвука для цельнокатаных колес, напрессованных на ось при текущем и среднем ремонте колесных пар с использованием стенда СДВК (СУДКП). Поэтому в данной статье хотелось рассмотреть проблему влияния температуры рабочей жидкости на чувствительность ультразвукового иммерсионного контроля. На основе полученных значений в ходе эксперимента установлена зависимость скорости ультразвука в стали от температуры дистиллированной воды, которая использовалась в качестве контактной среды для иммерсионного ультразвукового контроля. Проведен анализ изменения угла ввода ультразвука в сталь при увеличении температуры контактной среды от 18 до 36 °С. Сделаны выводы о температурном влиянии окружающей среды на выявляемость дефектов в цельнокатаных колесах при иммерсионном вводе ультразвука. Данная статья демонстрирует необходимость соблюдения температурного режима одновременно как при настройке, так и непосредственно при самом контроле.

Ключевые слова: колесная пара, цельнокатаное колесо, ремонт, ультразвуковой метод, иммерсионный контроль, дистиллированная вода, пьезоэлектрический преобразователь, чувствительность контроля, температура среды, скорость ультразвука, показание глубиномера, угол ввода, угол падения луча.

Alexander G. Otoka¹, Oleg V. Kholodilov²

¹Gomel Wagon Depot of RUE «Gomel Branch of the Belarusian Railway», Gomel, Republic of Belarus;

²Belarusian State University of Transport (BelSUT), Gomel, Republic of Belarus

INFLUENCE OF THE TEMPERATURE OF THE CONTACT MEDIUM FOR IMMERSION ULTRASONIC TESTING WHEELSETS OF WAGONS DURING REPAIR

Abstract. *In accordance with the technical regulations for the repair and maintenance of wheel sets of freight and passenger cars, one of the common methods by which the axle and solid-rolled wheels are checked for the presence of internal surface defects revealed in depth is ultrasonic. At the repair enterprises of the wagon economy of railways, including at the manufacturing plants of parts and components of wheel sets, in practice contact or immersion input of ultrasound into the controlled material is used. Depending on the approved documentation for the object and method of control, the availability of specialized equipment for non-destructive testing, enterprises prefer one or another method. It is known that the influence of ambient temperature directly affects the sensitivity of ultrasonic testing. Today, immersion ultrasound injection for solid-rolled wheels pressed onto the axle during the current and medium repairs of wheel sets using the stand SDVK (SUDKP) is popular on the Belarusian Railway. Therefore, in this article I would like to consider the problem of the influence of the temperature of the working fluid on the sensitivity of ultrasonic immersion testing. Based on the values obtained in the course of the experiment, the dependence of the speed of ultrasound in steel on the temperature of distilled water, which was used as a contact medium for immersion ultrasonic testing, was established. An analysis was made of the change in the angle of ultrasound input into steel with an increase in the temperature of the contact medium from 18 to 36 °C. Conclusions are drawn about the temperature effect of the environment on the detection of defects in solid-rolled wheels during immersion ultrasound injection. This article demonstrates the need to observe the temperature regime at the same time both during setup and directly in the control itself.*

Keywords: *wheelset, solid-rolled wheel, repair, ultrasonic method, immersion control, distilled water, piezoelectric converter, control sensitivity, medium temperature, ultrasound speed, depth gauge reading, input angle, beam angle of incidence.*

В настоящее время ремонт деталей и составных частей колесных пар грузовых и пассажирских вагонов невозможно представить без средств и методов неразрушающего контроля (НК). НК является неотъемлемой частью ремонта, технического обслуживания, и его применение связано с подтверждением качества выпускаемой продукции, в значительной мере влияющей на безопасность движения поездов, перевозки грузов и пассажиров. Основная задача НК при ремонте колесных пар – это исключение их поставки в эксплуатацию с несоответствующими параметрами и обеспечение надежности инфраструктуры железнодорожного транспорта и железнодорожного подвижного состава.

К основным методам НК деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте относят ультразвуковой, магнитопорошковый и вихретоковый.

Ультразвуковой (УЗ) контроль является одним из самых распространенных методов НК. Данный метод применяется для поиска различных дефектов материала (поры, трещины, различные включения, неоднородная структура и пр.) и является обязательной процедурой при изготовлении и эксплуатации многих ответственных изделий.

Широкое распространение при УЗ-контроле колесных пар получили два способа ввода УЗ в материал – контактный (рисунок 1, а) и иммерсионный (рисунок 1, б).

В данной статье хотелось бы остановиться на применении и проблеме влияния температуры рабочей жидкости на чувствительность иммерсионного ультразвукового контроля колесных пар при техническом обслуживании и ремонте в условиях структурных подразделений вагонного хозяйства железных дорог.

Применение иммерсионного способа связано в первую очередь с меньшим изменением чувствительности от нестабильности контакта через поверхность материала по сравнению с контактным способом [1]. При этом обеспечивается высокая скорость сканирования и производительность контроля. Также при иммерсионном вводе УЗ исключается механический износ пьезоэлектрического преобразователя (ПЭПа) из-за отсутствия трения между ним и

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

поверхностью контролируемого изделия, а значит, и отпадает необходимость частой замены изношенных ПЭПов.



Рисунок 1 – Способы ввода УЗ на примере элементов колесной пары:

a – контактный ввод УЗ (контроль поверхности катания цельнокатаного колеса поверхностной волной Рэлея при текущем и среднем ремонте колесной пары); *б* – иммерсионный ввод УЗ (контроль свободной оси колесной пары при изготовлении или капитальном ремонте)

Иммерсионный метод – УЗ-метод контроля, при котором объект контроля и преобразователь погружены в жидкость (рисунок 2), которую используют как промежуточную среду и (или) преломляющую призму [2].

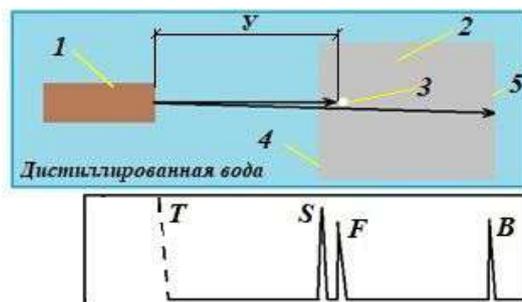


Рисунок 2 – Схема иммерсионного метода контроля: 1 – преобразователь ультразвуковой П211-2,5-20; 2 – объект контроля; 3 – несплошность/дефект; 4 – поверхность ввода; 5 – донная поверхность; y – показание глубиномера дефектоскопа, мм; T – зондирующий импульс; S – эхо-сигнал от поверхности; F – эхо-сигнал от дефекта/несплошности; B – донный эхо-сигнал

В качестве иммерсионной жидкости в большинстве случаев используют воду, в которую добавляют ингибиторы коррозии, а также вещества, улучшающие смачивание.

На Белорусской железной дороге хорошо зарекомендовал себя иммерсионный ввод УЗ, реализуемый на стенде УЗ-дефектоскопии колесных пар СУДКП (рисунок 3) [3].

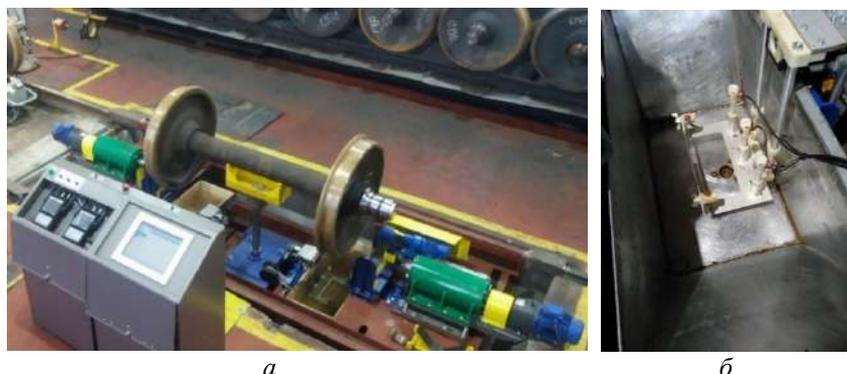


Рисунок 3 – Ультразвуковой контроль цельнокатаных колес при текущем и среднем ремонте колесных пар в Гомельском вагонном депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги»:

a – внешний вид стенда СУДКП; *б* – вид акустического блока с иммерсионными преобразователями

СУДКП позволяет выполнить ультразвуковую дефектоскопию ободьев и приободной зоны цельнокатаных колес колесной пары при полностью демонтированном буксовом узле, при наличии на оси лабиринтного кольца и внутренних колец подшипников, а также корпуса буксы со снятой смотровой крышкой.

Иммерсионный ввод УЗ на стенде СУДКП происходит через слой технической воды [4].

К основным типам дефектов цельнокатаных колес, выявляемых при контроле на стенде СУДКП, относят такие:

- поперечные единичные трещины в ободе;
- трещины гребня колеса;
- закатанные окисные пленки и расслоения, параллельные боковой поверхности обода;
- внутренние дефекты в ободе и в зоне перехода обода в диск.

Отметим, что на чувствительность иммерсионного контроля элементов колесных пар значительно влияет температура рабочей жидкости.

Практика показывает, что с изменением температуры окружающей среды меняется чувствительность контроля. Особенно это заметно в летнее время: когда температура окружающей среды растет, чувствительность УЗ-контроля снижается.

В соответствии со справочником [5] с увеличением температуры воды скорость УЗ в ней растет. Зависимость скорости c УЗ от температуры t имеет вид:

$$c = c_0[1 + b'(t - t_0)], \quad (1)$$

где c_0 – скорость УЗ при температуре t_0 и данном давлении p ; b' – относительный температурный коэффициент скорости УЗ, град⁻¹.

На практике часто пользуются видоизмененным выражением:

$$c = c_0 + b(t - t_0), \quad (2)$$

где b – абсолютный температурный коэффициент скорости УЗ, м·с⁻¹ · град⁻¹.

Известно [6], что при повышении температуры при контактном способе ввода УЗ угол ввода для наклонного ПЭПа увеличивается, так как скорость звука в призме уменьшается сильнее, чем в металле объекта контроля.

В случае производственной необходимости угол преломления должен быть установлен при конкретной действующей температуре, так как при нагревании призмы ПЭПа увеличивается угол преломления УЗ в металле. На практике в условиях изменения температуры контролируемого объекта точное определение угла преломления является непростой задачей [7].

Целью данной работы является анализ изменения угла ввода УЗ в сталь при иммерсионном способе контроля, установление зависимости скорости УЗ в стали, зависимости показаний глубиномера дефектоскопа от температуры дистиллированной воды, которая может использоваться на практике в качестве контактной среды.

В эксперименте не ставилась задача по изготовлению образца из аналогичной стали объекта контроля. Например, для осей колесных пар (Ст. ОсВ) или для цельнокатаных колес (Ст. 2Г, Ст. Т, Ст. 2, Ст. 1), так как последние не регламентируют однозначное значение углерода в ней. Поэтому выбор пал на конструкционную углеродистую сталь 20, которая имеет хорошие показатели прочности, твердости, как и перечисленные выше стали.

В работе [8] была установлена зависимость амплитуды эхо-сигнала от сквозного отверстия 3 мм (x_1 ; y_1) в образце, который изготовлен из материала сталь 20 (рисунок 4), от температуры технической воды, которая использовалась в качестве контактной среды. Было установлено, что с увеличением температуры воды снижаются показание глубиномера и чувствительность контроля.

В работе использовались УЗ-дефектоскоп УД2-102ВД «Пеленг», а в качестве УЗ-излучателя – преобразователь П211-2,5-20 № 184017, который закреплялся в оправку из

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

фторопласта и при помощи шаблона ШН ДУВК.741156.001 выставлялся под углом 90° к поверхности объекта контроля (угол ввода УЗ составлял 0°).

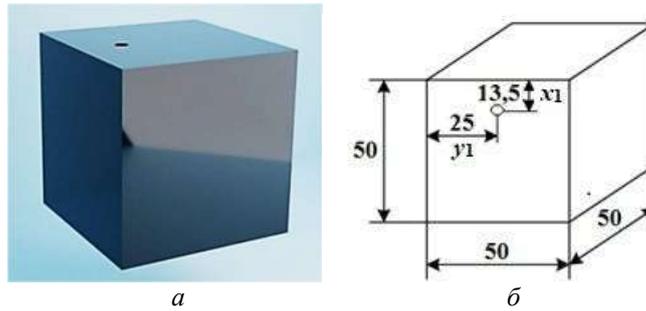


Рисунок 4 – Образец со сквозным отверстием диаметром 3 мм:

a – общий вид объекта контроля; *б* – габаритные размеры объекта контроля и координаты сквозного отверстия

В отличие от предыдущего эксперимента преобразователь выставлялся под углом 19° к поверхности образца, а в качестве контактной среды использовалась дистиллированная вода. Расстояние между ПЭПом и образцом составляло 50 мм.

Определение угла ориентации ПЭПа в горизонтальной плоскости по отношению к внутренней поверхности образца проверялось настроенным шаблоном ШН ДУВК.741156.001, совмещенным с одной стороны с плоскостью образца, а с другой стороны – со срезом верхней части корпуса крепления ПЭПа (рисунок 5).

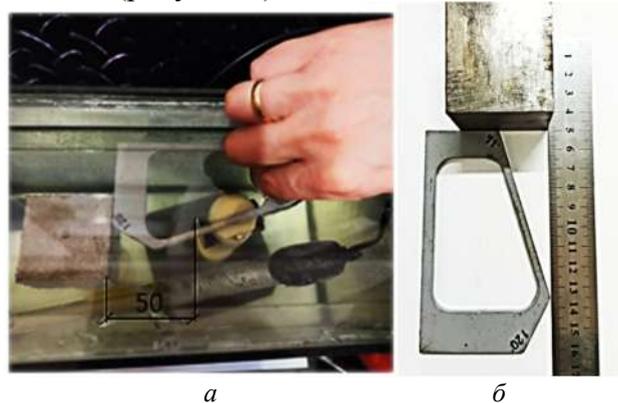


Рисунок 5 – Выставление угла падения УЗ 19° шаблоном ШН ДУВК.741156.001:

a – общий вид юстировки ПЭПа; *б* – применяемые средства измерений по определению линейных и угловых характеристик по отношению к объекту контроля

В ходе проведения эксперимента температура изменялась при помощи терморегулятора и контролировалась с помощью жидкостного термометра марки СП-2 с ценой деления 2°C в диапазоне измерения температур $0 - 100^\circ\text{C}$. Начальная температура воды составляла 18°C .

При падении УЗ-колебаний под углом γ к поверхности на границе раздела происходит трансформация волн, схема которой показана на рисунке 6.

На рисунке 6 обозначено: γ – угол падения; k_{11} – угол преломления продольной волны; k_{12} – угол преломления трансформированной поперечной волны; C_{11} – скорость падающей продольной волны; C_{12} – скорость преломленной продольной волны; C_{12} – скорость преломленной трансформированной поперечной волны.



Рисунок 6 – Схема образования преломленных волн в стали при падении УЗ-колебаний под углом γ

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Рассчитаем угол ввода УЗ при угле падения 19° в соответствии с законом Снеллиуса [1]:

$$\sin \gamma / \sin k = C_{11} / C_{12}, \quad (3)$$

где γ – угол падения УЗ; k – угол ввода; C_{11} – скорость УЗ-колебаний в дистиллированной воде (падающая продольная волна); C_{12} – скорость УЗ-колебаний в образце, изготовленном из стали 20 (преломленная продольная волна).

В образце нас интересует наличие поперечной волны, так как она является преобладающей в связи с большим углом падения, при котором начинает исчезать преломленная продольная волна. Тогда в соответствии с законом Снеллиуса (3)

$$\sin \gamma / \sin k = C_{11} / C_{12},$$

где C_{12} – скорость преломленной трансформированной поперечной волны.

При угле падения УЗ 19° угол ввода в сталь составит: $\sin 19 / \sin k = 1490 / 3260$, тогда $\sin k = 0,71$ и $\gamma = \arcsin 0,71 = 45^\circ$.

Пьезоэлектрический преобразователь с рабочей частотой 2,5 МГц устанавливался в воду на расстояние 50 мм от контролируемого образца. Изменением длительности развертки и усиления дефектоскопа на его экране получали изображение первого отраженного эхо-сигнала от стенки образца, при этом эхо-сигнал от отверстия диаметром 3 мм располагался в непосредственной близости от него по центру экрана прибора (рисунок 7).



Рисунок 7 – Вид экрана дефектоскопа УД2-102ВД: 1 – зондирующий импульс; 2 – сигнал, отраженный от поверхности образца; 3 – сигнал от отверстия диаметром 3 мм; 4 – расстояние до отверстия диаметром 3 мм; 5 – усиление дефектоскопа; 6 – браковочный уровень

Настройка дефектоскопа УД2-102ВД производилась в соответствии с параметрами, приведенными в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры дефектоскопа

Частота ПЭПа, МГц	Схема включения	Угол ввода УЗ, град	Скорость, м/с	Начало зоны временной селекции (ВС1), мм	Конец зоны временной селекции (ВС1), мм	Амплитуда импульса	Тип ПЭПа
2,5	Совмещенная	45	3260	После первого отраженного эхо-сигнала от стенки образца	180	Высокая	П211-2,5

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

При помощи кнопок усиления дефектоскопа в соответствии с рекомендациями [9, 10] доводили сигнал от отверстия 3 мм до браковочного уровня, что составляет 50 % экрана. После повышения температуры дистиллированной воды на каждые 2 °С в меню общие параметры дефектоскопа изменяли скорость УЗ в образце до первоначального расстояния $Y = 98$ мм, тем самым фиксировали изменение скорости C_1 и расстояние Y (см. рисунок 2).

В ходе эксперимента был произведен равномерный нагрев образца в интервале от 18 до 36 °С с шагом 2 °С, который контролировался термометром. После каждого изменения температуры среды (дистиллированной воды) с помощью дефектоскопа фиксировались изменения скорости УЗ и координаты дефекта на глубиномере дефектоскопа (таблица 2, рисунок 8).

Таблица 2 – Результаты эксперимента с дистиллированной водой

Температура воды T , °С	Скорость УЗ в образце из стали C_1 , м/с	Δ_1 , м/с	Скорость УЗ в воде C_2 , м/с [4]	Δ_2 , м/с	Координата Y сквозного отверстия
18	3260	–	1476	–	98,0
20	3271	11	1483	7	97,7
22	3285	14	1489	6	97,3
24	3297	12	1494	5	96,9
26	3311	14	1500	6	96,5
28	3322	11	1505	5	96,2
30	3332	10	1509	4	95,9
32	3343	11	1514	5	95,6
34	3355	12	1518	4	95,3
36	3365	10	1522	4	95,0

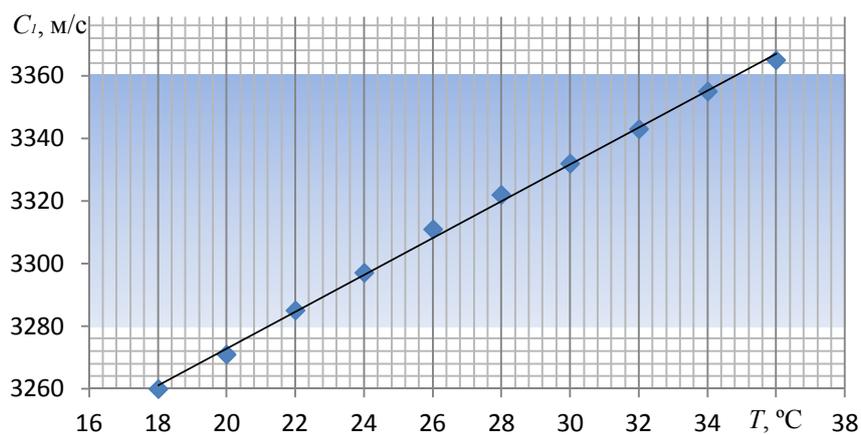


Рисунок 8 – Зависимость скорости УЗ в образце от температуры среды

Сравнивая изменение скорости УЗ в стали с известными данными по изменению скорости УЗ в дистиллированной воде [5] в зависимости от температуры, можно говорить об их линейной зависимости (рисунок 9).

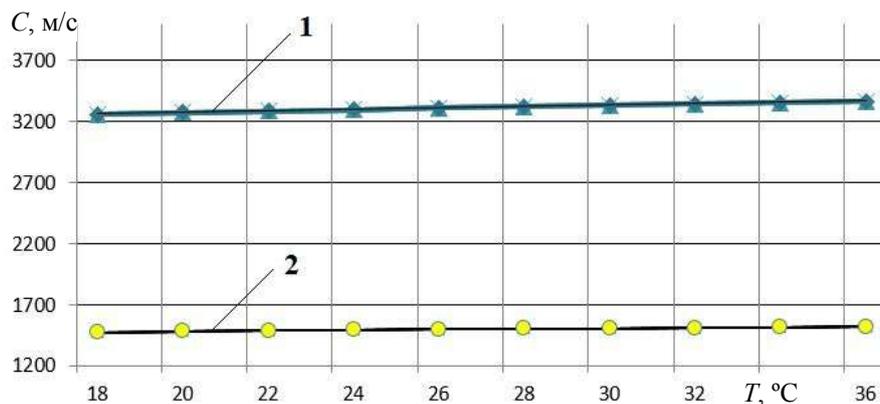


Рисунок 9 – Зависимость скорости УЗ в образце (1) и дистиллированной воде (2) от температуры

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Отличие заключается только в разности показаний между измерениями по скорости УЗ в стали Δ_1 и дистиллированной воде Δ_2 . Так как скорость в дистиллированной воде примерно в 2,2 раза меньше, чем скорость в стали, то $\Delta_2 < \Delta_1$.

Исследования показали (рисунок 10), что с увеличением температуры воды растет скорость УЗ как в стали, так и в самой контактной среде. Соответственно уменьшается показание глубиномера дефектоскопа (координата Y) и увеличивается угол ввода в сталь.

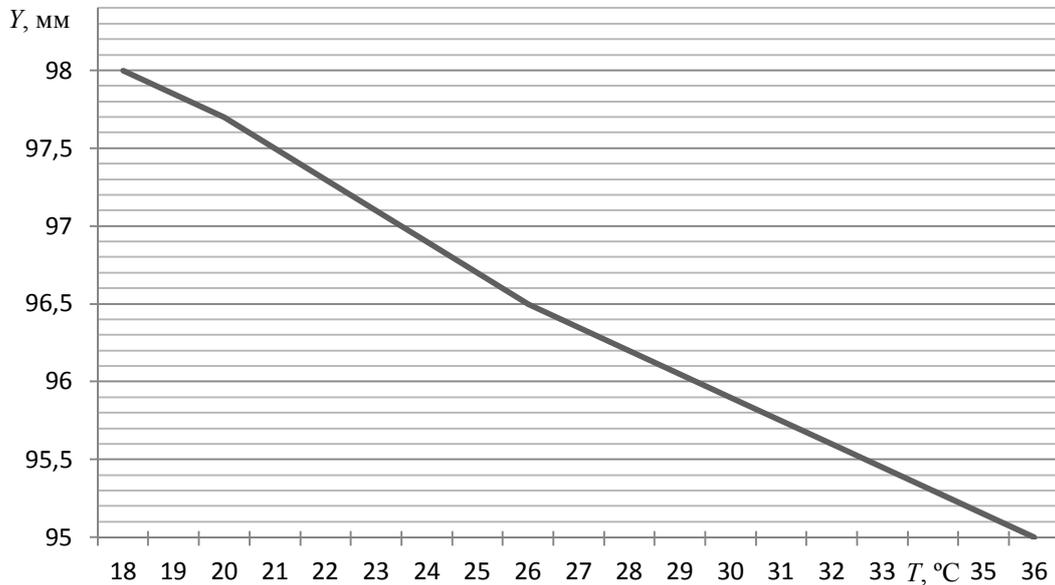


Рисунок 10 – Зависимость показаний глубиномера дефектоскопа от температуры среды

Рассчитаем угол ввода в сталь 20 при температуре воды 36 °C: $\sin 19 / \sin k = 1490 / 3365$, тогда $\sin k = 0,74$ и $\gamma = \arcsin 0,74 = 48^\circ$. Таким образом, при увеличении температуры среды от 18 до 36 °C угол ввода изменился на 3°.

Эксперимент был проведен только для одного типа преобразователя – П211-2,5-20 (производитель – ООО НПГ «Алтек») в условиях постоянного расстояния между преобразователем с углом падения УЗ-луча 19° и объектом контроля.

Результаты эксперимента показали, что настройка уровня браковочной чувствительности ПЭПа в условиях определенной температуры контактной среды не дает гарантии выявления дефектов в металле при изменении температуры этой же среды. Незначительное изменение температуры контактной среды уже ведет к изменению угла ввода УЗ-луча. Поэтому контроль элементов колесных пар вагонов иммерсионным способом настоятельно рекомендуется проводить при той же температуре среды, при которой проходила настройка чувствительности. При этом необходимы постоянный контроль угла ориентации ПЭПа (угла падения) к поверхности объекта контроля при помощи настроенного шаблона и юстировка ПЭПа в случае невыявления эталонных отражателей при настройке чувствительности.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что температура контактной среды при иммерсионном УЗ-контроле играет важную роль при выявлении дефектов в цельнокатаных колесах и осях колесных пар вагонов. Поэтому соблюдение температурного режима как при настройке браковочной чувствительности, так и при проведении непосредственно иммерсионного УЗ-контроля является залогом высокой чувствительности метода.

Список литературы

1. Неразрушающий контроль : справочник : в 8 томах / под общ. ред. В. В. Клюева. – Т. 3. Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – 2-е изд., испр. – Москва : Машиностроение, 2008. – 864 с. – Текст : непосредственный.

2. ГОСТ Р ИСО 5577–2009. Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль. Словарь. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 27 с. – Текст : непосредственный.
3. Патент № 6017 Республика Беларусь, МПК: G01M 17/10, G01M 17/08, G01N 29/04. Стенд для ультразвуковых испытаний колесных пар рельсового подвижного состава: а 20000607 : заявлено 26.06.2000: опубликовано 30.03.2004 / Бычек И. С., Комаровский И. С., Дубина А. В. – 3 с.; ил. – Текст : непосредственный.
4. 1803.829-00.00.003 ТИ Технологическая инструкция по ультразвуковому контролю ободьев цельнокатаных колес дефектоскопом УД2-102 «Пеленг» на стенде СДВК 1803.829-00.00.000: утв. гл. инж. Белорусской железной дороги от 20.12.2018 №1094НЗ, 2018. – 25 с. – Текст : непосредственный.
5. Справочник химика 21. Химия и химическая технология // chem21.info : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.chem21.info/page/103014194056088134092151198030182222193227175239> (дата обращения: 26.05.2023).
6. Ермолов, И. Н. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии : краткий справочник / И. Н. Ермолов, А. Х. Вopilкин, В. Г. Бадалян. – Москва : НПЦ НК ЭХО+, 2004. – 109 с. – Текст : непосредственный.
7. Высокотемпературный ультразвуковой контроль при температурах, превышающих 50 °C или 125 °F // diagnost.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.diagnost.ru/ultrazvukovoe-izmerenie-tolshhiny/vysokotemperaturnyj-ultrazvukovoj-uz-kontrol.html> (дата обращения: 25.05.2023).
8. Отока, А. Г. Исследование влияния температуры технической воды на обнаружение дефектов в металле при иммерсионном ультразвуковом контроле / А. Г. Отока. – Текст : электронный // Современные научные исследования и инновации. – 2022. – № 8 – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2022/08/98764> (дата обращения: 24.05.2023).
9. Дефектоскоп «Peleng» («Пеленг») УД2-102ВД. Часть I. Описание и техническое обслуживание. ДШЕЕК.412239.001 РЭ1 : Руководство по эксплуатации. – Санкт-Петербург : [б. и.], 2018. – 80 с. – Текст : непосредственный.
10. Дефектоскоп «Peleng» («Пеленг») УД2-102ВД. Часть II. Использование по назначению. ДШЕЕК.412239.001 РЭ2 : Руководство по эксплуатации. – Санкт-Петербург : [б. и.], 2017. – 68 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Kljuev V.V. ed., Ermolov I.N., Lange Ju.V. *Nerazrushaiushchii kontrol' : spravochnik : v 8 tomakh. T. 3: Ul'trazvukovoi kontrol'* [Non-destructive testing : reference book : in 8 volumes. Vol. 3: Ultrasonic testing]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 2008, 864 p. (In Russian).
2. National Standart ISO 5577–2009. Non-destructive testing. Ultrasonic inspection. Vocabulary. Moscow, Standardinform Publ., 2011. 27 p. (In Russian).
3. Byчек I.S., Komarovskij I.S., Dubina A.V. *Patent BY № 6017*, 30.03.2004.
4. 1803.829-00.00.003 Technical instructions for ultrasonic inspection of the rims of solid-rolled wheels with a flaw detector UD2-102 «Bearing» at the SDVC stand 1803.829-00.00.000. Belarusian Railway, 2018, 25 p. (In Russian).
5. *Spravochnik khimika 21. Khimii i khimicheskaiia tekhnologiia* [Chemist's Handbook 21. Chemistry and Chemical Technology]. Available at: <https://www.chem21.info/page/103014194056088134092151198030182222193227175239/> (accessed 26.05.2023).
6. Ermolov I.N., Vopilkin A.Kh., Badaljan V.G. *Raschety v ul'trazvukovoi defektoskopii: kratkii spravochnik* [Calculations in ultrasonic flaw detection: a short reference]. Moscow, NPC NK ECHO+ Publ., 2004, 109 p. (In Russian).
7. *Vysokotemperaturnyj ul'trazvukovoj kontrol' pri temperaturah, prevyshajushhih 50 °C ili 125 °F* [High temperature ultrasonic testing at temperatures exceeding 50°C or 125°F]. Available at: <https://www.diagnost.ru/ultrazvukovoe-izmerenie-tolshhiny/vysokotemperaturnyj-ultrazvukovoj-uz-kontrol.html> (accessed 25.05.2023).
8. Oтока A.G. Investigation of the effect of process water temperature on the detection of defects in metal during immersion ultrasonic testing. *Sovremennye nauchnye issledovaniia i innovacii* –

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Modern scientific research and innovation, 2022, no. 8. Available at: URL: <https://web.snauka.ru/issues/2022/08/98764> (accessed 24.05.2023).

9. Flaw detector «Peleng» («Bearing») UD2-102VD. Part I. Description and maintenance. JACK.412239.001 RE 1: User Manual. Saint-Petersburg, 2018, 80 p. (In Russian).

10. Flaw detector «Peleng» («Bearing») UD2-102VD. Part II. Intended use. JACK.412239.001 RE 2: Operation Manual. Saint-Petersburg, 2017, 68 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Отока Александр Генрикович

Гомельское вагонное депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги».

Телегина ул., д. 1а, г. Гомель, 246014, Республика Беларусь.

Магистр технических наук, инженер-технолог (руководитель подразделения неразрушающего контроля).

Тел.: +375 (232) 95-28-32.

E-mail: otokaaleksandr@gmail.com

Холодилев Олег Викторович

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ).

Кирова ул., д. 34, г. Гомель, 246653, Республика Беларусь.

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вагоны».

Тел.: +375 (232) 95-39-08.

E-mail: olhol@tut.by

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Отока, А. Г. Влияние температуры контактной среды на иммерсионный ультразвуковой контроль колесных пар вагонов при ремонте / А. Г. Отока, О. В. Холодилев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 3 (55). – С. 24 – 33.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Otoka Alexander Genrikovich

Gomel Wagon Depot of RUE «Gomel Branch of the Belarusian Railway».

1a, Telegina st., Gomel, 246014, Republic of Belarus.

Master of Sciences in Engineering, process engineer (head of the non-destructive testing unit).

Phone: +375 (232) 95-28-32.

E-mail: otokaaleksandr@gmail.com

Kholodilov Oleg Viktorovich

Belarusian State University of Transport (BelSUT).

34, Kirova st., Gomel, 246653, Republic of Belarus.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, professor of the department «Wagons».

Phone: +375 (232) 95-39-08.

E-mail: olhol@tut.by

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Otoka A.G., Kholodilov O.V. Influence of the temperature of the contact medium for immersion ultrasonic testing wheel sets of wagon during repair. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 3 (55), pp. 24-33.

УДК 629.4.015

И. И. Галиев, М. Х. Минжасаров, Д. В. Липунов

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

АНАЛИЗ ПРИЧИН НЕИСПРАВНОСТЕЙ КОЖУХА ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ЛОКОМОТИВА 2ЭС6 «СИНАРА»

Аннотация. В статье представлен анализ причин неисправностей механической части локомотивов 2ЭС6 «Синара» за 2017 – 2022 гг. Наибольшее количество отказов узлов механической части приходится на кожух зубчатой передачи (КЗП). Причины выхода из строя КЗП можно разделить на две группы: неисправности болта крепления и появление трещин. Масса КЗП локомотивов 2ЭС6 значительно выше устанавливаемых на локомотивы серии ВЛ10, в связи с чем произвести их замену без выкатки колесно-моторного блока из-под локомотива не представляется возможным, что существенно увеличивает простой локомотива как на плановом, так и на неплановом ремонте. Распределение числа выходов из строя кожухов по месяцам показывает, что в зимне-весенний период, с декабря по апрель, происходит значительное увеличение числа отказов, для остальных периодов года такие отказы носят единичный характер. Математическая модель вертикальных колебаний тягового подвижного состава, полученная на основе уравнения Лагранжа второго рода, в виде системы из четырех дифференциальных уравнений позволяет оценить нагруженность узлов

локомотива в эксплуатации в зависимости от времени года. В спектральной плотности случайных возмущений имеются коэффициенты, которые позволяют учитывать время года и состояние железнодорожного пути. Интегрирование системы дифференциальных уравнений в программе MathCAD позволяет установить, что в зимний период происходит значительное увеличение максимальных угловых ускорений галопирования ТЭД и линейных ускорений подпрыгивания колесной пары, что и является причиной увеличения числа выходов из строя КЗП в зимне-весенний период. Для определения причины существенного увеличения выходов из строя болтов крепления КЗП рассмотрено его напряженно-деформированное состояние на основе принципа Даламбера и четвертой энергетической теории фон Мизеса. Получены зависимости требуемого внутреннего диаметра резьбы болта крепления КЗП от скорости движения локомотива для различных классов прочности болтов.

Ключевые слова: тяговый подвижной состав, кожух зубчатой передачи, математическая модель, расчетная схема, динамическая нагруженность, вертикальные колебания, галопирование тягового электродвигателя, подпрыгивание колесной пары, напряженно-деформированное состояние, болты крепления.

Ilkham I. Galiev, Marat Kh. Minzhasarov, Dmitry V. Lipunov

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

THE LOCOMOTIVE 2ES6 «SINARA» GEAR HOUSING MALFUNCTIONS CAUSES ANALYSIS

Abstract. The article presents an analysis of the causes of malfunctions of the mechanical part of 2ES6 "Sinara" locomotives for 2017-2022. The largest number of failures of the mechanical components falls on the gear housing (KZP). The reasons for the failure of the KZP can be divided into two groups: malfunctions of the fastening bolt and the appearance of cracks. The mass of the KZP of 2ES6 locomotives is significantly higher than those installed on the VL10 series locomotives, and therefore it is not possible to replace them without rolling out the wheel-motor unit from under the locomotive, which significantly increases the downtime of the locomotive both on planned and unplanned repairs. The distribution of the number of failures of casings by month shows that in the winter-spring period, from December to April, there is a significant increase in the number of failures, for the rest of the year they are isolated. The mathematical model of vertical vibrations of traction rolling stock, obtained on the basis of the Lagrange equation of the second kind, in the form of a system of four differential equations, allows us to estimate the loading of locomotive units in operation depending on the time of year. There are coefficients in the spectral density of random disturbances that allow taking into account the time of year and the condition of the railway track. Integration of the system of differential equations in the MathCAD program allows us to establish that in winter there is a significant increase in the maximum angular accelerations of the TED galloping and linear accelerations of the wheelset bouncing, which is the reason for the increase in the number of failures of the KZP in the winter-spring period. To determine the cause of a significant increase in the failures of the bolts of the KZP fastening, its stress-strain state is considered on the basis of the Dalmert principle and the fourth von Mises energy theory. The dependences of the required internal diameter of the thread of the KZP fastening bolt on the speed of movement of the locomotive for different classes of bolt strength are obtained.

Keywords: traction rolling stock, gear housing, mathematical model, design scheme, dynamic loading, vertical oscillations, galloping of the traction motor, bouncing of the wheelset, stress-strain state, fastening bolts.

Механическая часть локомотивов функционирует в сложных условиях: динамическое взаимодействие с железнодорожным путем, взаимодействие с вагонами в продольном направлении, вписывание в кривые, следовательно, возникают различные усилия, которые приводят к повышенной динамической нагруженности узлов экипажной части. Надежность узлов экипажной части обеспечивает безопасность движения поездов, следовательно, к ним предъявляют повышенные требования.

Компания ОАО «РЖД» заканчивает интенсивное обновление парка тягового подвижного состава. В сервисном локомотивном депо Московка происходит замена морально устаревших локомотивов ВЛ10 на локомотивы 2ЭС6 «Синара». Эксплуатация локомотивов новых поколений выявила ряд проблем, которые требуют незамедлительного решения. Статистический анализ количества выходов из строя узлов механического оборудования электровозов 2ЭС6 «Синара» за шесть лет – с 2017 по 2022 г. – представлен на рисунках 1 и 2.

Исходя из представленного статистического материала, можно сделать вывод о том, что на протяжении шести лет – с 2017 по 2022 г. – произошло 1544 случая выхода из строя узлов экипажной части. Основными причинами отказов механического оборудования являются выход из строя следующих узлов: кожуха зубчатой передачи (КЗП) (436 случаев, 28 %);

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

бандажей колесных пар (244 случая, 16 %); кабины управления и стеклопакетов (171 случай, 11 %); песочного оборудования (151 случай, 10%); моторно-осевого подшипника (105 случаев, 7 %); кузова, рамы кузова и путеочистителей (116 случаев, 7 %) и т. д.

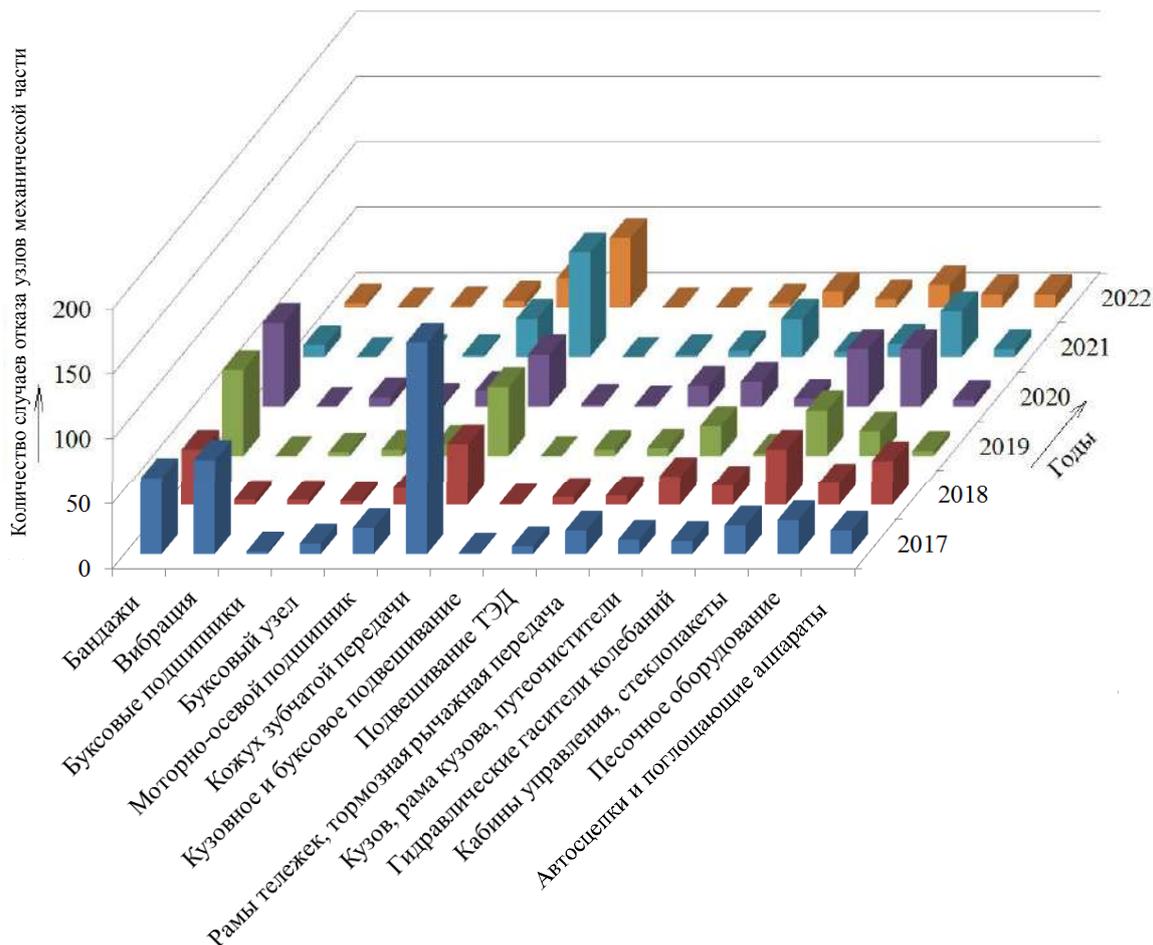


Рисунок 1 – Выходы из строя узлов механической части электровозов 2ЭС6 за 2017 – 2022 гг.

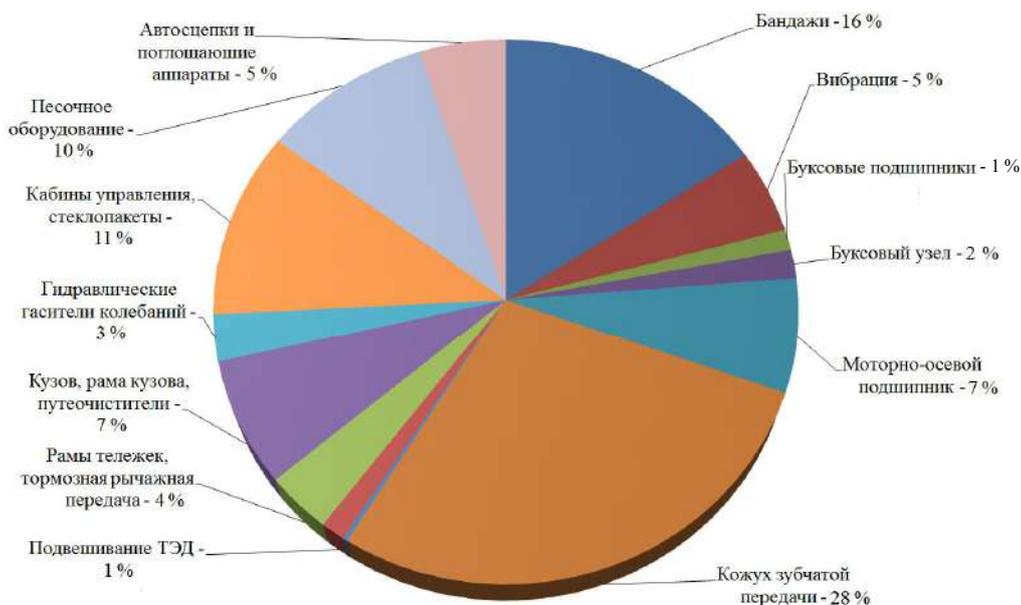


Рисунок 2 – Диаграмма распределения выходов из строя узлов механической части электровозов 2ЭС6 за 2017 – 2022 гг.

Наибольшее количество отказов приходится на кожух зубчатой передачи, который предназначен для защиты от воздействий внешней среды и формирует масляную ванну, используемую для смазывания. КЗП (рисунок 3) состоит из двух половин, сварен из листовой стали (толщина листов – 5 мм), крепится к остову тягового электродвигателя тремя болтами М36 [1, 2].

По выходам из строя КЗП наблюдается увеличение за 2021 – 2022 гг. – 133 случая против 93 случаев в предыдущие два года. Для проведения детального анализа выходов из строя рассмотрим основные причины, которые представлены на рисунке 4: излом болта крепления (76 случаев, 57 %); отсутствие болта крепления (20 случаев, 15 %); ослабление болтов крепления (16 случаев, 13 %); трещина по сварному шву (12 случаев, 9 %); сорвана резьба болта крепления (4 случая, 3 %); трещина кронштейна крепления (3 случая, 2 %); пробой днища корпуса (2 случая, 1 %).

Причины выхода из строя КЗП можно разделить на две группы: неисправности крепления (116 случаев, 87 %) и появление трещин (15 случаев, 12 %). На электровозах 2ЭС6 применяются кожухи в трех исполнениях, масса которых варьируется от 130 до 174 кг. При увеличении массы кожуха зубчатой передачи диаметр болтов крепления кожухов снижен с 42 до 36 мм, что приводит к массовым случаям излома болтов М36 в бобышках крепления. При этом извлечение обломанной резьбовой части болта из бобышки в ряде случаев не представляется возможным. Сами же бобышки соединены с боковинами кожуха посредством неразъемного сварного соединения. Соответственно для восстановления работоспособности кожуха при данном виде неисправности необходимо срезание старой бобышки, изготовление и приваривание новой.

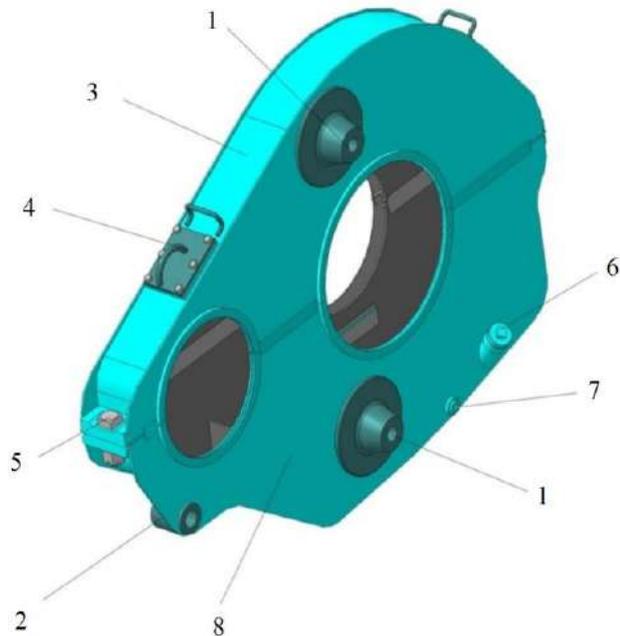


Рисунок 3 – Кожух зубчатой передачи электровоза 2ЭС6 «Синара»: 1 – бонка подвески кожуха; 2 – втулка подвески кожуха; 3 – верхняя половина кожуха; 4 – сапун; 5 – болт сочленяющий; 6 – заправочная горловина; 7 – сливная горловина с магнитной пробкой; 8 – нижняя половина кожуха

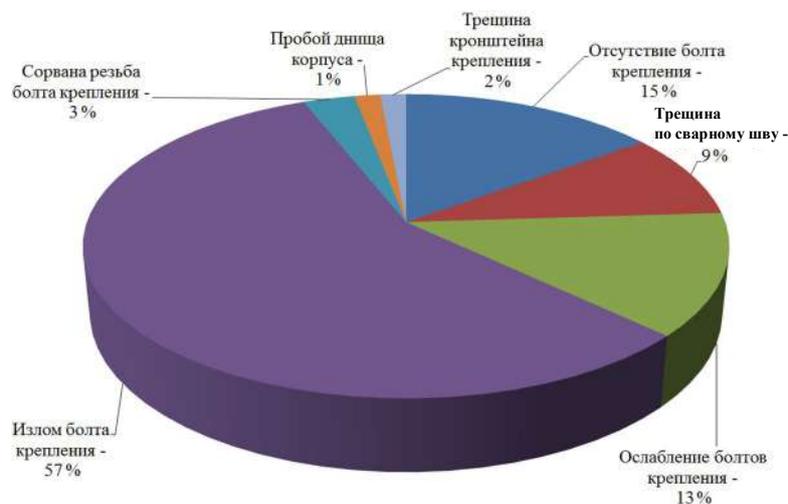


Рисунок 4 – Причины выходов из строя кожуха зубчатой передачи электровозов 2ЭС6 за 2021 – 2022 гг.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Масса КЗП локомотивов 2ЭС6 значительно выше устанавливаемых на локомотивы серии ВЛ10, в связи с чем произвести их замену без выкатки колесно-моторного блока из-под локомотива не представляется возможным (взаимозаменяемых облегченных кожухов из стеклопластика конструкцией локомотива не предусмотрено), что существенно увеличивает простой локомотива как на плановом, так и на неплановом ремонте.

Распределение числа выходов из строя кожухов по месяцам представлено на рисунке 5.

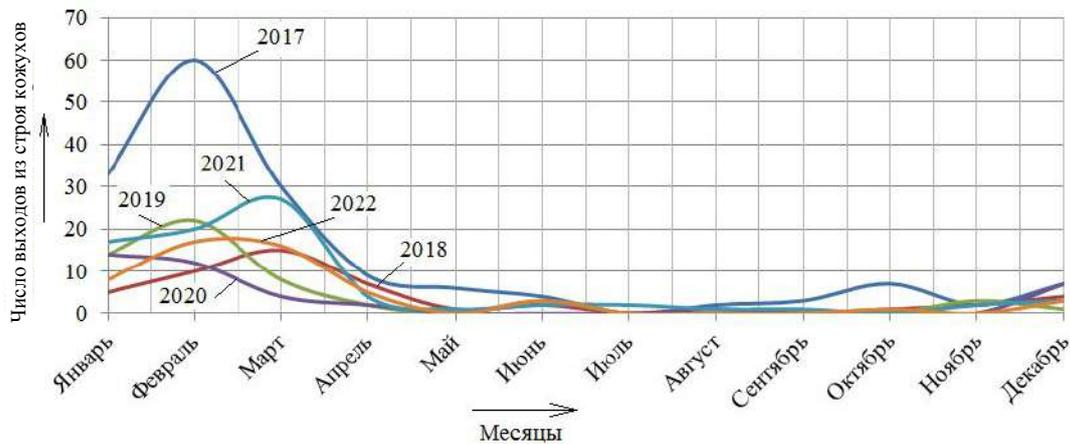


Рисунок 5 – Распределение числа выходов из строя кожухов зубчатой передачи электровозов 2ЭС6 за 2017 – 2022 гг. по месяцам

Согласно статистике в зимне-весенний период, с декабря по апрель, происходит увеличение числа отказов, для остальных времен года отказы носят единичный случай. Особенностью эксплуатации электровозов в зимний период является повышение динамической нагруженности узлов механической части, которая обусловлена повышением жесткости, коэффициента вязкого трения и приведенной массы пути в два – три раза [3, 4], а также повышением жесткостей и коэффициентов вязкого трения упругодиссипативных элементов экипажной части локомотивов. Пониженные температуры окружающей среды в зимний период приводят к снижению пластичности металла и к повышению его хрупкости, что снижает надежность узлов механической части.

Для исследования динамической нагруженности узлов локомотива 2ЭС6 «Синара» в работе [5] была предложена модель колебаний в вертикальной продольной плоскости, которая позволяет учесть изменение параметров механической системы «экипаж – путь» в зависимости от времени года:

$$\begin{cases}
 m_k \ddot{z}_k + \beta_k (\dot{z}_k - \dot{z}_t) + c_k (z_k - z_t) = 0; \\
 m_t \ddot{z}_t + \beta_k (\dot{z}_t - \dot{z}_k) + \beta_\phi (\dot{z}_t - \dot{z}_{к.п}) + \beta_{пов} (\dot{z}_t + \dot{\phi}_d (l+d) - \dot{z}_{к.п}) + \\
 + c_k (z_t - z_k) + c_\phi (z_t - z_{к.п}) + c_{пов} (z_t + \phi_d (l+d) - z_{к.п}) = 0; \\
 [m_d l^2 + J_d + J_y ((i_{пр} + 1) / i_{пр})^2] \ddot{\phi}_d - m_d l \ddot{z}_{к.п} + \beta_{пов} [(l+d)^2 \dot{\phi}_d + (l+d) \dot{z}_t - (l+d) \dot{z}_{к.п}] + \\
 + c_{пов} [(l+d)^2 \phi_d + (l+d) z_t - (l+d) z_{к.п}] = 0; \\
 (m_{к.п} + m_d + m_n) \ddot{z}_{к.п} - m_d l \ddot{\phi}_d + \beta_\phi (\dot{z}_{к.п} - \dot{z}_t) + \beta_{пов} (\dot{z}_{к.п} - \dot{z}_t - (l+d) \dot{\phi}_d) + \beta_n \dot{z}_{к.п} + \\
 + c_\phi (z_{к.п} - z_t) + c_{пов} (z_{к.п} - z_t - (l+d) \phi_d) + c_n z_{к.п} = m_n \ddot{\eta} + \beta_n \dot{\eta} + c_n \eta.
 \end{cases} \quad (1)$$

где z_k – обобщенная координата подпрыгивания кузова; z_t – обобщенная координата подпрыгивания тележки; $z_{к.п}$ – обобщенная координата подпрыгивания колесной пары; z_d – обобщенная координата подпрыгивания тягового двигателя (ТЭД); z_n – перемещение приведенных масс пути; ϕ_d – угол поворота тягового двигателя относительно оси колесной пары; J_k – момент инерции кузова; J_d – момент инерции тягового двигателя; J_y – момент инерции якоря тягового двигателя; m_k – масса кузова; m_t – масса обрессоренных частей

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

тележки; $m_{к.п}$ – масса колесной пары; m_d – масса тягового двигателя; $m_{п}$ – приведенная масса пути; c_k – жесткость центральной ступени подвешивания; c_b – жесткость буксовой ступени подвешивания; $c_{пов}$ – жесткость поводка; $c_{п}$ – приведенная жесткость пути; β_k – коэффициент вязкого трения центральной ступени подвешивания; β_b – коэффициент вязкого трения буксовой ступени подвешивания; $\beta_{пов}$ – коэффициент вязкого трения в резинометаллических элементах поводка; $\beta_{п}$ – приведенный коэффициент вязкого трения пути; η – случайная функция неровности рельса под колесной парой; l – расстояние между осями колесной пары и якоря ТЭД; d – расстояние между осью якоря и точкой подвеса ТЭД; $i_{пр}$ – передаточное отношение зубчатой передачи.

В уравнении, описывающем подпрыгивания колесной пары, в правой части имеем неровность пути, которая в случае описания колебаний системы в частотной области может быть аппроксимирована спектральной плотностью неровности пути, позволяющей учесть время года [6]. По зарегистрированным записям экспериментальных исследований определены наиболее важные характеристики спектральной плотности: дисперсия D , коэффициенты α и β , зависящие от скорости движения V :

а) для летнего времени года:

$$D = (0,16 + 0,035V + 0,0016V^2)96,236; \quad \beta = 170 + 5V; \quad (2)$$

б) для зимнего времени года:

$$D = (0,36 + 0,065V + 0,0028V^2)96,236; \quad \beta = 310 + 10V. \quad (3)$$

Выражение для спектральной плотности имеет вид:

$$S_z(\omega, V) = \frac{\alpha DK}{\pi} \frac{\alpha^2 + \beta^2 + \omega^2}{(\alpha^2 + \beta^2 - \omega^2) + 4\alpha^2 \omega^2}, \quad (4)$$

где D – дисперсия виброускорений колесной пары, m^2/c^4 ; K – коэффициент состояния пути; α и β – коэффициенты, c^{-1} ; V – скорость движения, км/ч:

$$\alpha = \frac{\beta}{3}. \quad (5)$$

Профессор А. И. Беляев установил, что коэффициент β равняется собственным частотам колебания колесной пары вместе с приведенной массой пути и его повышение с увеличением скорости движения локомотива является следствием того, что жесткость пути – функция скорости движения. Учитывая, что коэффициенты α и β зависят от жесткости пути, их значения будут зависеть от времени года.

На основании формулы (4) в программе MathCAD получены графики спектральной плотности ускорений колесной пары локомотива для летнего (рисунок 6) и зимнего (рисунок 7) периодов года при хорошем состоянии пути.

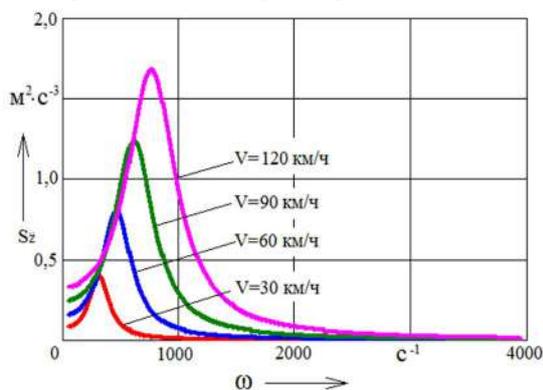


Рисунок 6 – Спектральные плотности ускорений колесной пары локомотива (лето)

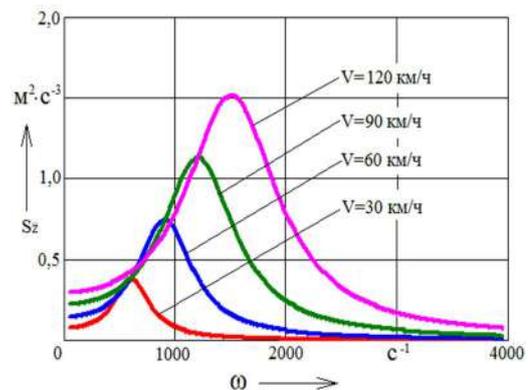


Рисунок 7 – Спектральные плотности ускорений колесной пары локомотива (зима)

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Кожух имеет консольное крепление к остову тягового электродвигателя тремя болтами М36 [1, 2]. Болтовые крепления в динамике подвижного состава рассматриваются как жесткие связи [3], следовательно, колебания остова тягового электродвигателя передаются через них на КЗП практически без изменения. Колебания остова ТЭД в системе (1) описываются галопированием ТЭД и подпрыгиванием колесной пары, на которую он опирается в случае опорно-осевого подвешивания. Таким образом, КЗП совершает плоскопараллельное движение в вертикальной продольной плоскости, для описания которого достаточно двух обобщенных координат: галопирования ТЭД и подпрыгивания колесной пары, которые определяются интегрированием системы дифференциальных уравнений (1).

При проведении расчета по системе уравнений (1) параметры, относящиеся к пути, принимаем для летнего и зимнего периодов года согласно работе [4]. Система (1) линейная и допускает аналитическое решение, которое получается по формулам Крамера. Передаточная функция определяется соотношением выходного и входного сигналов, преобразованных по Лапласу при нулевых начальных условиях. Ниже представлены графики амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) для галопирования тягового двигателя и подпрыгивания колесной пары (рисунки 8, 9) в зимнее и летнее время.

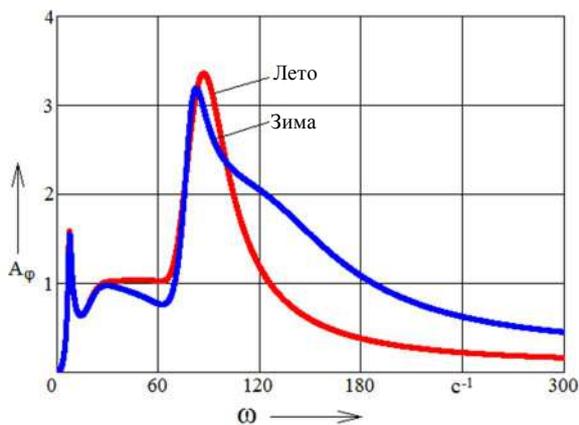


Рисунок 8 – АЧХ галопирования тягового электродвигателя

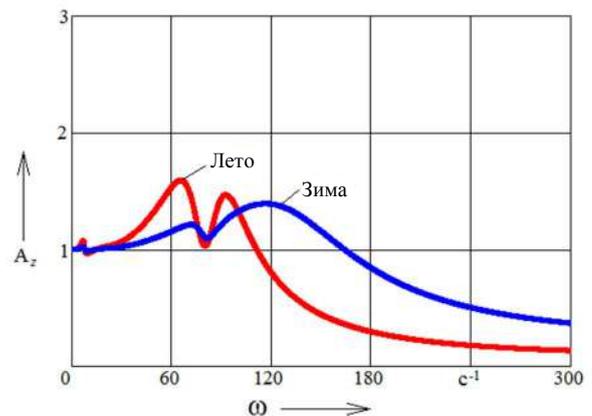


Рисунок 9 – АЧХ подпрыгивания колесной пары

Для статистических исследований случайных колебаний локомотива важное значение имеет АЧХ, которая является модулем частотной передаточной функции. Она зависит от инерционных и упругодиссипативных параметров железнодорожного экипажа и пути. На графиках имеются изменения, которые зависят от параметров пути в различное время года. В дорезонансной и в резонансной зонах значительных изменений не происходит, за исключением незначительного сглаживания или смещения резонансных пиков. В зарезонансной зоне колебаний, свыше 100 с^{-1} , происходит значительное усиление АЧХ галопирования ТЭД и подпрыгивания колесной пары, что приводит к более интенсивным колебаниям данных узлов и, как следствие, КЗП, следовательно, в зимне-весенний период происходит повышение его динамической нагруженности.

После определения АЧХ перемещений узлов локомотива, используя спектральную плотность неровности пути, вычислим спектральную плотность вертикальных ускорений узлов, их среднеквадратические отклонения и максимальные отклонения, графики которых представлены на рисунках 10, 11. В зимний период происходит значительное увеличение максимальных угловых ускорений галопирования ТЭД и линейных ускорений подпрыгивания колесной пары, например, при скорости движения электровоза со скоростью 60 км/ч можно наблюдать трехкратное увеличение данных показателей динамических качеств, что и является причиной увеличения числа выходов КЗП из строя в зимне-весенний период (см. рисунок 5). Полученные значения ускорений представляют большой практический интерес, так как

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

именно они определяют значение главного вектора сил инерции и главного момента сил инерции, возникающих в КЗП при его колебаниях.

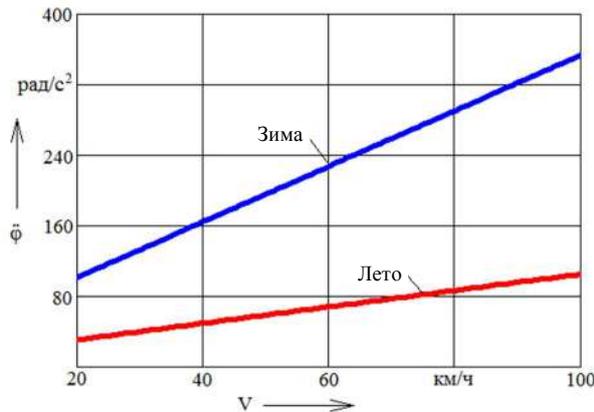


Рисунок 10 – Максимальные ускорения галопирования тягового двигателя

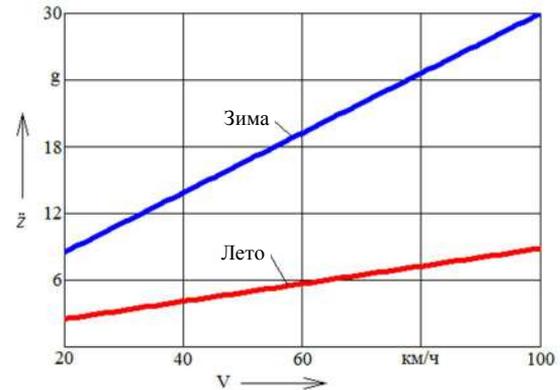


Рисунок 11 – Максимальные ускорения подпрыгивания колесной пары

Для определения причины существенного увеличения выходов из строя крепления КЗП необходимо рассмотреть его напряженно-деформированное состояние. Так как нагружающие факторы носят динамический характер, то анализ проводим на основе принципа Даламбера, который имеет широкое применение при расчете конструкции и узлов, находящихся под действием динамических нагрузок [7, 8], на прочность. При этом в качестве нагружающих факторов выступают сила тяжести КЗП \vec{G} , главный вектор сил инерции $\vec{\Phi}$ и главный момент сил инерции M^Φ , под действием которых появляются динамические реакции в точках крепления КЗП к ТЭД. После приложения к КЗП главного вектора и главного момента сил инерции можно допустить, что КЗП находится в условном «динамическом равновесии».

Расчетная схема для определения динамической нагруженности болтов представлена на рисунке 12.

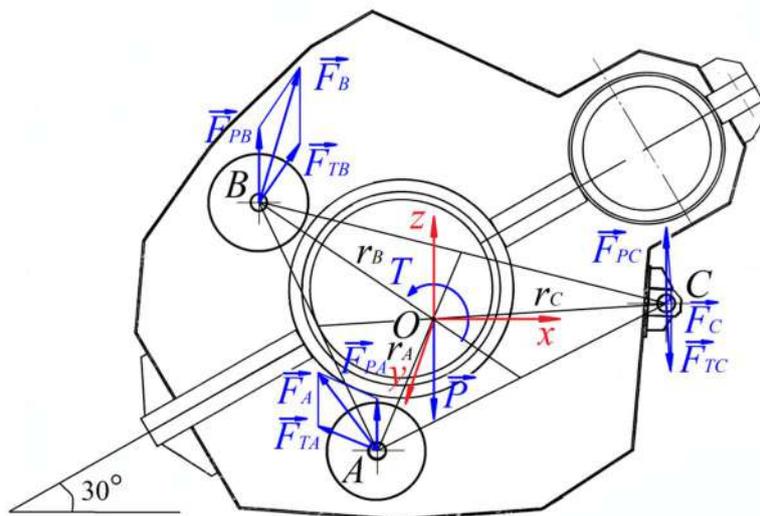


Рисунок 12 – Расчетная схема для определения динамической нагруженности болтов

Крепление КЗП к ТЭД осуществляется тремя болтами М36 в точках A , B , C . Материал болтов – конструкционная легированная хромистая сталь 40Х, класс прочности применяемых болтов должен быть не ниже 8.8, для которых минимальное временное сопротивление равно 800 МПа и предел текучести – 480 МПа. Болты устанавливаются в отверстия соединяемых деталей с зазором и рассчитываются на растяжение с учетом кручения. Учитывая, что тело болта испытывает сложное напряженное состояние, можно применить четвертую энерги-

ческую теорию прочности фон Мизеса, при этом величина эквивалентного напряжения в теле болта определится по формуле [9, 10]:

$$\sigma_{\text{э}} = \sqrt{\sigma_p^2 + 3\tau_{\text{кр}}^2} = \sqrt{\left(\frac{4F_0}{\pi d_3^2}\right)^2 + 3\left(\frac{16F_0 \cdot d \cdot k_p}{\pi d_3}\right)^2} = \frac{4F_0}{\pi d_3^2} \sqrt{1 + 48\left(\frac{d \cdot k_p}{d_3}\right)^2} = \sigma_p \cdot K_{\text{кр}}, \quad (6)$$

где σ_p – напряжения растяжения, МПа; $\tau_{\text{кр}}$ – напряжения кручения, МПа; F_0 – усилие предварительной затяжки, Н; d_3 – внутренний диаметр резьбы по дну впадин, мм; d – плечо силы, введенное для сохранения размерности момента, мм; k_p – коэффициент резьбы.

Расчет болта затянутого болтового соединения представляет собой расчет на растяжение с увеличением на коэффициент $K_{\text{кр}}$, учитывающий напряжения кручения в теле болта при затяжке, который зависит от типа резьбы и для метрической резьбы $K_{\text{кр}} = 1,3$. По правилам статики необходимо привести все силы и моменты, действующие на КЗП, к центру тяжести треугольного контура ABC , который находится в точке O . При приведении сил тяжести и инерции, изначально приложенных к центру масс КЗП, появятся дополнительные моменты M_y и M_x , следовательно,

$$\vec{P} = \vec{G} + \vec{\Phi}; \quad (7)$$

$$T = M_{\Phi} + M_y. \quad (8)$$

Момент M_x будет действовать в плоскости, перпендикулярной к ABC , и его действие будет направлено на свое раскрытие; учитывая то, что плоскость контура находится на незначительном расстоянии от центра тяжести КЗП, действием этого момента пренебрегаем, ввиду его малости. Учитывая принцип независимости действующих сил, рассмотрим отдельно действие силы и момента в плоскости ABC . Сила \vec{P} должна быть уравновешена силами трения, обусловленными затяжкой болтов. Делая допущение, что детали обладают достаточной жесткостью, считаем распределение нагрузки \vec{P} между болтами равномерным, следовательно,

$$\vec{P} = \vec{F}_{PA} + \vec{F}_{PB} + \vec{F}_{PC}, \quad (9)$$

где $\vec{F}_{PA}, \vec{F}_{PB}, \vec{F}_{PC}$ – силы трения в плоскости контура от действия силы \vec{P} .

Момент T также действует в плоскости контура и должен быть уравновешен моментами сил трения:

$$T = F_{TA} r_A + F_{TB} r_B + F_{TC} r_C, \quad (10)$$

где F_{TA}, F_{TB}, F_{TC} – силы трения в плоскости ABC от действия момента T ; r_A, r_B, r_C – плечи сил относительно центра тяжести сечения.

В общем случае при совместном действии сдвигающей силы и сдвигающего момента усилие предварительной затяжки болтов F_0 может быть определено по выражению:

$$F_0 = \frac{K_{\text{б}}}{f} \left(\frac{F_c}{z} + \frac{T \cdot r_{\text{max}}}{\sum_{i=1}^z r_i^2} \right), \quad (11)$$

где f – коэффициент трения, для стальных стыков при механической обработке 0,1 – 0,15; z – число болтов; r_{max} – расстояние от центра соединения до центра самого отдаленного болта;

$\sum_{i=1}^z r_i^2$ – сумма квадратов расстояний от центра соединения до центра болтов;

$K_{\text{б}}$ – коэффициент безопасности по условию сдвига, при динамическом нагружении $K_{\text{б}}$ принимается равным двум.

Диаметр тела болта, который равен внутреннему диаметру резьбы, определяем по уравнению:

$$d_3 \geq \sqrt{\frac{4F_0 \cdot K_{кр}}{\pi [\sigma_p]}}. \quad (12)$$

В дальнейшем получаем зависимость требуемого внутреннего диаметра резьбы болта крепления КЗП от скорости движения локомотива (рисунок 13). Кривые построены для различных классов прочности болтов, а именно – 8.8, 9.8, 10.9 и 12.9. Согласно полученным графикам при скорости 62 км/ч диаметр болта М36 с классом прочности 8.8, который равен 31,093 мм, может не обеспечить усилие предварительной затяжки болтов, необходимое для формирования сил и моментов сил трения в плоскости контура, что повысит вероятность сдвига по плоскости. Для болтов М36 с классами прочности 9.8 и 10.9 такими скоростями являются 73 и 95 км/ч. В полной мере обеспечивающим прочность контура по сдвигу является болт М36 с классом прочности 12.9. Следовательно, болты, применяемые для крепления КЗП, не на всех скоростях движения гарантируют отсутствие сдвига, что, как правило, приводит к ухудшению условий функционирования болтов, которые в случае возникновения сдвига должны гарантировать выполнение условий прочности на срез или смятие в теле болта.

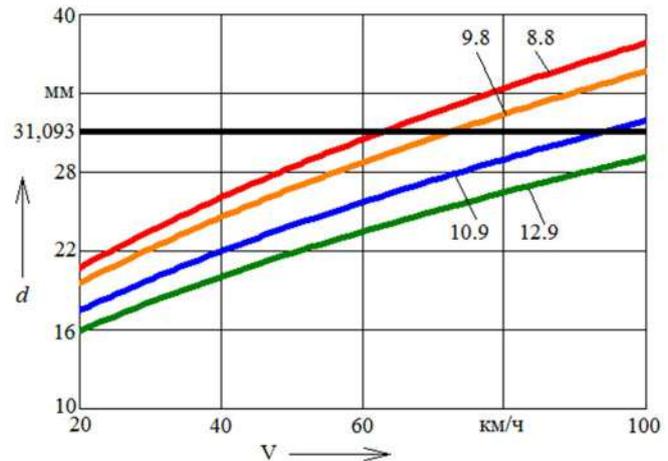


Рисунок 13 – Зависимость внутреннего диаметра резьбы болта крепления КЗП от скорости движения локомотива

Расчеты проведены для удовлетворительного состояния пути, в случае плохого состояния пути произойдет увеличение числа выходов из строя болтов крепления КЗП к ТЭД.

Таким образом, на основе проведенного анализа можно заключить, что необходимо принять меры для снижения динамической нагруженности болтов крепления КЗП к ТЭД, не меняя конструкции узлов, это можно сделать на основе применения болтов М36 с классом прочности не ниже 12.9.

Другими способами снижения динамической нагруженности являются такие:

1) конструктивные изменения путем замены болтов М36 на болты М42, которые применялись для крепления кожухов на локомотивах ВЛ10, или применение призонных болтов;

2) отказ от консольного крепления КЗП к ТЭД, что позволит повысить надежность его крепления.

Следует заметить, что данные мероприятия являются борьбой со следствиями, в то время как первопричиной повышенной динамической нагруженности болтов крепления являются низкие динамические качества, присущие подвешиванию тягового привода первого класса, при котором неровности пути передаются фактически без снижения на остов ТЭД, к которому прикреплен КЗП.

Список литературы

1. Брексон, В. В. Электровоз 2ЭС6 «Синара» / В. В. Брексон, Н. Б. Никифорова, А. А. Струннов. – Верхняя Пышма : ООО «Уральские локомотивы», 2015. – 328 с. – Текст : непосредственный.

2. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 «Синара» с коллекторными тяговыми электродвигателями : руководство по эксплуатации. В 9 частях. Часть 6. Механическое оборудование и системы вентиляции. – Верхняя Пышма: ОАО «УЗЖМ», 2008. – 97 с. – Текст : непосредственный.

3. Механическая часть тягового подвижного состава / под ред. И. В. Бирюкова. – Москва : Транспорт, 1992. – 440 с. – Текст : непосредственный.
4. Основы механики подвижного состава : учебное пособие / И. И. Галиев, В. А. Нехаев [и др.]. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – Часть 1. – 202 с. – Текст : непосредственный.
5. Галиев, И. И. Оценка динамической нагруженности колесно-моторных блоков электровозов 2ЭС6 / И. И. Галиев, М. Х. Минжасаров, Д. В. Липунов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 71–79.
6. Беляев, А. И. Вероятностные характеристики стохастических колебаний колесной пары тепловоза 2ТЭ10Л / А. И. Беляев, В. К. Белов. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 1971. – № 1. – С. 36–40.
7. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений / под ред. А. Ф. Смирнова. – Москва : Стройиздат, 1984. – 415 с. – Текст : непосредственный.
8. Дарков, А. В. Сопротивление материалов : учебник / А. В. Дарков, Г. С. Шпиро. – Москва : Альянс, 2014. – 622 с. – Текст : непосредственный.
9. Кузьмин, А. В. Расчеты деталей машин / А. В. Кузьмин, И. Н. Чернин, Б. С. Козинцов. – Минск : Вышэйшая школа, 1986. – 400 с. – Текст : непосредственный.
10. Прикладная механика. Расчет соединений деталей машин : учебное пособие / В. Н. Бельков, Н. В. Захаренков [и др.]. – Омск : Омский гос. техн. ун-т, 2021. – 252 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Brekson V.V., Nikiforova N.B., Strunnov A.A. *Electrovoz 2ES6 «Sinara»* [Electric locomotive 2ES6 «Sinara»]. Upper Pyshma, Ural Locomotives LLC Publ., 2015, 328 p. (In Russian).
2. *Elektrovoz gruzovoi postoiannogo toka 2ES6 «Sinara» s kollektornymi tiagovymi elektrodvigateliami: rukovodstvo po ekspluatatsii. V 9 chastiakh. Chast' 6. Mekhanicheskoe oborudovanie i sistemy ventilyatsii* [Electric freight locomotive DC 2ES6 "Sinara" with collector traction motors: operating manual. In 9 parts. Part 6. Mechanical equipment and ventilation systems]. Upper Pyshma, JSC «UZZHM» Publ., 2008, 97 p. (In Russian).
3. Biryukov I.V. ed., *Mekhanicheskaya chast' tiagovogo podvizhnogo sostava* [Mechanical part of traction rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1992, 440 p. (In Russian).
4. Galiev I.I., Nekhaev V.A., Nikolaev V.A. et al. *Osnovy mekhaniki podvizhnogo sostava: uchebnoe posobie* [Fundamentals of rolling stock mechanics: textbook]. Part 1. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2013, 202 p. (In Russian).
5. Galiev I.I., Minzhasarov M.Kh., Lipunov D.V. Evaluation of dynamic loading of wheel-motor units of electric locomotives 2ES6. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 3 (51), pp. 71-79 (In Russian).
6. Belyaev A.I., Belov V.K. Probabilistic characteristics of stochastic oscillations of a 2TE10L diesel locomotive wheelset. *Vestnik VNIIZhT – Russian railway science journal*, 1971, no. 1, pp. 36-40 (In Russian).
7. Smirnov A.F. ed. *Stroytel'naya mekhanika. Dinamika i ustoychivost sooruzheniy* [Construction mechanics. Dynamics and stability of structures]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1984, 415 p. (In Russian).
8. Darkov A.V., Shpiro G.S. *Soprotivlenie materialov: uchebnik* [Resistance of materials: textbook]. Moscow, Alliance Publ., 2014, 622 p. (In Russian).
9. Kuzmin A.V., Chernin I.N., Kozintsov B.S. *Raschety detalei mashin* [Calculations of machine parts]. Minsk: Higher School Publ., 1986, 400 p. (In Russian).
10. Belkov V.N., Zakharenkov N.V. et al. *Prikladnaya mekhanika. Raschet soedinenii detalei mashin: uchebnoe posobie* [Applied mechanics. Calculation of connections of machine parts: textbook]. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2021, 252 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галиев Ильхам Исламович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, советник при ректорате ОмГУПС, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика».

Тел.: +7 (3812) 31-16-09.

E-mail: Prezident@omgups.ru

Минжасаров Марат Хайргельдаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-55.

E-mail: mmx90@yandex.ru

Липунов Дмитрий Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (908) 319-03-68.

E-mail: dima-lipunov@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Галиев, И. И. Анализ причин неисправностей кожуха зубчатой передачи локомотива 2ЭС6 «Синара»/ И. И. Галиев, М. Х. Минжасаров, Д. В. Липунов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 3 (55). – С. 33 – 44.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galiev Ikham Islamovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, advisor to the rector's office of OSTU, honored scientist of RF, professor of the department «Theoretical and applied mechanics».

Phone: +7 (3812) 31-16-09.

E-mail: Prezident@omgups.ru

Minzhasarov Marat Khajergeldajevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Theoretical and applied mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-55.

E-mail: mmx90@yandex.ru

Lipunov Dmitry Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Theoretical and applied mechanics», OSTU.

Phone: +7 (908) 319-03-68.

E-mail: dima-lipunov@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Galiev I.I., Minzhasarov M.Kh., Lipunov D.V. The locomotive 2ES6 «Sinara» gear housing malfunctions causes analysis. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 3 (55), pp. 33-44 (In Russian).

УДК 004.658.2

П. А. Красильников, М. Ю. Соколов, Д. Ю. Роменский

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ СТАНДАРТА OPENSTREETMAP ДЛЯ ЗАДАЧ, СВЯЗАННЫХ С ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Аннотация. Общая информация о железнодорожной инфраструктуре в России относится к информации ограниченного доступа в соответствии с федеральным законодательством и внутренними регламентами владельцев железнодорожной инфраструктуры. Сведения о путевом развитии, техническом оснащении и принципах работы отдельных железнодорожных линий и железнодорожного транспорта в целом могут быть получены для исследовательских, коммерческих или социальных целей только непосредственно от владельца железнодорожной инфраструктуры при его желании. В статье рассматривается проблематика использования открытых геоинформационных данных для нужд цифровизации железнодорожного транспорта и рассматриваются возможности создания экосистемы использования геоданных на железнодорожном

транспорте. В качестве базы для построения этой экосистемы предлагается использовать опыт, накопленный при использовании ГИС Openstreetmap – системы с открытыми правами для использования, активно используемой для картографирования по всему миру. На примере нескольких объектов Московского транспортного узла показано, что даже нанесение общедоступных сведений на карту ГИС дает широкие возможности для публичного и проприетарного использования на железнодорожном транспорте. С помощью этих данных может быть в кратчайшие сроки сформирован полноценный «цифровой двойник» любого объекта железнодорожной инфраструктуры, что чрезвычайно актуально для малых владельцев инфраструктуры. Использование таких моделей открывает возможности их применения в процессах управления перевозочным процессом, управления жизненным циклом объектов инфраструктуры, при проведении маркетинговых исследований, а также на всех этапах проектирования и строительства инфраструктурных объектов.

Объектом исследования был полигон Центрального (Московского) транспортного узла, предметом – топографические характеристики железнодорожной инфраструктуры, имеющие значение для эксплуатации железнодорожных линий.

Ключевые слова: геоинформационные системы, транспорт, проектирование, железная дорога, карта, информация, открытые данные, железнодорожная станция, перегон.

Pavel A. Krasilnikov, Michail Y. Sokolov, Dmitriy Y. Romenskiy

Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation

USING OPENSTREETMAP DATA FOR RAIL TRANSPORT

Abstract. General information about the railway infrastructure in Russia refers to information of limited access in accordance with federal legislation and internal regulations of the owners of the railway infrastructure. Information about the track development, technical equipment and operating principles for the each railway line and railway transport in general can be obtained for research, commercial or social purposes only directly from the owner of the railway infrastructure, if he so desires. The article deals with the problems of using open geoinformation data for the needs of digitalization of railway transport and considers the possibilities of creating an ecosystem for using geodata in railway transport. As a basis for building this ecosystem, it is proposed to use the experience gained with the use of the OpenStreetMap – a system with open rights for use, actively used for mapping around the world. On the example of several objects of the Moscow transport hub, it is shown that even the application of publicly available information to a GIS map provides ample opportunities for public and proprietary use in railway transport. With the help of these data, a full-fledged «digital twin» of any railway infrastructure facility can be formed in the shortest possible time, which is extremely important for small infrastructure owners. The use of such models opens up the possibility of their use in the processes of managing the transportation process, managing the life cycle of infrastructure facilities, when conducting marketing research, as well as at all stages of designing and building infrastructure facilities. The object of the study was the Central (Moscow) transport hub, the subject – the topographic characteristics of the railway infrastructure, which are important for the operation of railway lines.

Keywords: geographic information systems, transport, design, railway, map, information, open data, railway station, hauling.

Общая информация о железнодорожной инфраструктуре в России относится к информации ограниченного доступа в соответствии с федеральным законодательством и внутренними регламентами владельцев железнодорожной инфраструктуры. Сведения о путевом развитии, техническом оснащении и принципах работы отдельных железнодорожных линий и железнодорожного транспорта в целом могут быть получены для исследовательских, коммерческих или социальных целей только непосредственно от владельца железнодорожной инфраструктуры при его желании. С одной стороны, это обеспечивает некоторый уровень сохранности информации, составляющей государственную и коммерческую тайну, но с другой стороны, в условиях свободного обмена информацией и увеличивающейся точности спутниковых систем военного и гражданского назначения ограничение на общение с базовыми сведениями о техническом оснащении железнодорожного транспорта начинает становиться препятствием в процессе цифровизации железнодорожного транспорта в целом. На железнодорожном транспорте только крупные компании, с учетом масштаба бизнеса, могут позволить себе разработку собственных IT-решений и создание технических решений по внедрению «умной железной дороги», а другие участники перевозочного процесса и представители смежных отраслей ограничены в использовании возможностей цифровизации

на транспорте из-за монополизма на информацию. Проблематика использования открытых геоинформационных данных и повышение степени использования возможностей, которые дает использование современных ГИС (геоинформационных систем) для нужд цифровизации железнодорожного транспорта, доказывают свою актуальность в свете успешности использования подобных данных в урбанистике, градостроительстве и транспортном планировании в городах.

Актуальность свободного обмена топографическими данными на транспорте. В хозяйственной деятельности владельцев железнодорожной инфраструктуры, например, в хозяйстве управления движением, необходимая для работы административно-управленческих сотрудников топографическая информация о эксплуатации железной дороги берется из ряда разрозненных источников: технико-распорядительных актов станций (ТРА), схем путевого развития станций (в том числе в электронном виде, например, в корпоративных ГИС), схем крупных станций и узлов в парках путей, схематические графы железнодорожных полигонов, например, в программах «ГИД-Урал» и «Эльбрус» и в коммерческих ГИС, таких как Яндекс-карты и Google Maps.

Данные решения не в полной мере удовлетворяют концепции «Цифровой железной дороги», все более распространенной в мире благодаря тем безграничным возможностям совершенствования бизнес-процессов и своей результативности [1]. Цифровая железная дорога – это комплекс практик и решений, направленных на повышение эффективности процессов эксплуатации и управления железной дорогой за счет инновационных цифровых инструментов [2], среди которых можно выделить: ERTMS, BIM-технологии в строительстве [3], ГИС для управления железнодорожным транспортом (ArcGIS Rail и др.), PLM-системы (системы управления жизненным циклом продукта) и иные виды «цифровых двойников» стационарных объектов и подвижного состава железнодорожного транспорта [4, 5].

Цель внедрения практик «умной железной дороги» заключается в создании комплексной универсальной модели железнодорожной инфраструктуры – «цифрового двойника» на основе ГИС, подходящего для решения самых разнообразных задач, в том числе автоматизации некоторых процессов эксплуатации, планирования, строительства и исследования. Для внедрения таких решений необходимо выполнить следующие базовые задачи.

1. Выбрать тип и платформу размещения данных (открытая/закрытая, облачная/локальная и т. д.).
2. Определить, какие данные необходимо внести в модель для работы с ней и способы работы с этими данными.
3. Определить методы и средства анализа, моделирования, визуализации данных, включая перспективные, для последующей разработки модулей, работающих в формируемой «экосистеме» обмена информацией.

Объектом исследования данной статьи является полигон Центрального (Московского) транспортного узла, предметом – топографические характеристики железнодорожной инфраструктуры, имеющие значение для эксплуатации железнодорожных линий.

Использование принципов открытых ГИС на железнодорожном транспорте. ГИС *OpenStreetMap (OSM)* [6] – популярный некоммерческий картографический проект, полностью открытый для любого использования, обработки и внесения данных любым пользователем. Основные плюсы сервиса – полностью открытый исходный код и абсолютная независимость от каких-либо стран или корпораций, а также возможность не только просматривать, но и добавлять, изменять информацию любым зарегистрированным пользователям. Совокупность данных факторов делает *OSM* наиболее удобным и надежным инструментом для использования во многих прикладных задачах социального, научного и коммерческого плана.

Любой объект на *OSM* имеет два типа информации: непосредственно географическую информацию об объектах и атрибуты объектов. Географическая информация дает понимание о типологии объекта (точка, линия, замкнутый контур) и географические данные о

координатах вершин, составляющих фигуру объекта на поверхности земли. Атрибуты объекта включают в себя его тип (автомобильная дорога, здание, река, лавочка и многие другие) и большое количество второстепенной информации о нанесенном на карту объекте. Второстепенная информация варьируется в зависимости от типа объекта и может содержать в себе самые разные признаки: разрешенную скорость движения по автомобильной дороге, наличие светофора, материал покрытия и многое другое, в зависимости от того, с каким именно объектом производятся операции [7].

Для упрощения работы с геоданными, включая автоматизацию, все объекты и атрибуты записываются в виде коротких двусложных ключей на основе англоязычной лексики, где первое слово обозначает параметр или категорию, а второе – его значение (в виде ключ=значение). Так, железнодорожный путь обычной колеи будет записан как *railway=rail* (где *railway* – это рельсовая инфраструктура вообще, а *rail* – значение ключа для обычной железной дороги); ширина колеи записывается тегом *gauge=1520* (где *gauge* – колея, 1520 – ширина в миллиметрах) и т. д.

Железнодорожная инфраструктура в редакторе *OSM* представлена широким спектром как объектов (железнодорожные линии, стрелки, светофоры, железнодорожные переезды, отдельные пункты и их парки), так и их атрибутов. Так, железнодорожные линии (*railway=*) могут иметь такие типы [8]:

1) *abandoned* – заброшенные и частично/полностью разобранные;

2) *construction* – строящиеся;

3) *disused* – неиспользуемые, но в отличие от *abandoned* сохранившиеся физически и многие другие.

Помимо типологии железнодорожный путь может иметь также несколько атрибутов, описывающих следующее:

1) тип железнодорожной линии (*usage=*) – магистральная (*main*), подводящая или малодейственная (*branch*), промышленная (*industrial*) и т. д.;

2) тип пути (*service=*) – приемоотправочный (*siding*), сортировочный или деповский (*yard*), подъездной путь (*spur*), диспетчерский съезд (*crossover*);

3) тип электрификации, напряжение и частоту тока;

4) номер пути;

5) нижнее строение пути и искусственные сооружения, по которым он проходит: насыпь, выемка, тоннель, мост и т. д.

Тот же принцип используется и для прочих элементов железнодорожной инфраструктуры: стрелочных переводов, железнодорожных переездов, путевых упоров, пикетных столбиков, станций и их парков.

Методология внесения данных. Авторами была проведена работа по актуализации схем путевого развития станций в границах Центрального транспортного узла, очерченных по следующим отдельным пунктам: Малоярославец, Можайск, Шаховская, Клин, Вербилки, Пост 81 км, Орехово-Зуево, Черусти, Голутвин, Ожерелье, Серпухов. На участках железнодорожных линий, находящихся ближе к Москве от указанных выше станций, апробированы следующие виды работы.

1. Актуализация путевого развития станций и отдельных пунктов: нанесение корректной схемы путевого развития, нумерации путей, их специализации. Нанесение данных о стрелочных переводах и их номерах, железнодорожных переездах в границах станций, тупиковых упорах.

2. Нанесение данных о скоростном режиме: максимальная разрешенная скорость на главных и приемоотправочных путях, соединительных ветвях.

3. Уточнение данных о железнодорожной автоматике и телемеханике: нанесение светофоров, типа сигнализации и связи на линии. Данная работа была проделана только на некоторых перегонах Московского центрального кольца.

Основной используемый редактор данных – *ID* (встроенный редактор *OSM*), для внесения правок использовался также *JOSM* (*Java OpenStreetMap Editor* [9], редактор *OSM* на основе языка программирования *Java*). По сравнению с *ID JOSM* дает возможность автоматизировать процесс внесения однотипных правок, таких как наделение атрибутами путей на крупных станциях, нумерация стрелочных переводов и т. д.

Практическое применение геоинформационной модели Центрального транспортного узла. В результате картографирования был создан пример геоинформационной модели железнодорожных линий Центрального транспортного узла. Применение полученной модели предполагается при решении следующих задач: а) анализ существующей железнодорожной инфраструктуры; б) моделирование различных процессов участка, линии, полигона; в) визуализация коммерческих данных, востребованных грузоотправителями и пассажирами.

Первая цель достигается без применения специальных инструментов исключительно при помощи веб-сервисов. Одним из основных картографических сервисов на базе *OSM* является веб-портал *OpenRailwayMap* – открытая железнодорожная карта. Данный сервис позволяет за несколько секунд получить масштабные схемы полигона, железнодорожной линии, участка или даже отдельной станции на основе данных, внесенных в *OSM*. Пример изображения из данного сервиса приведен на рисунке 1.

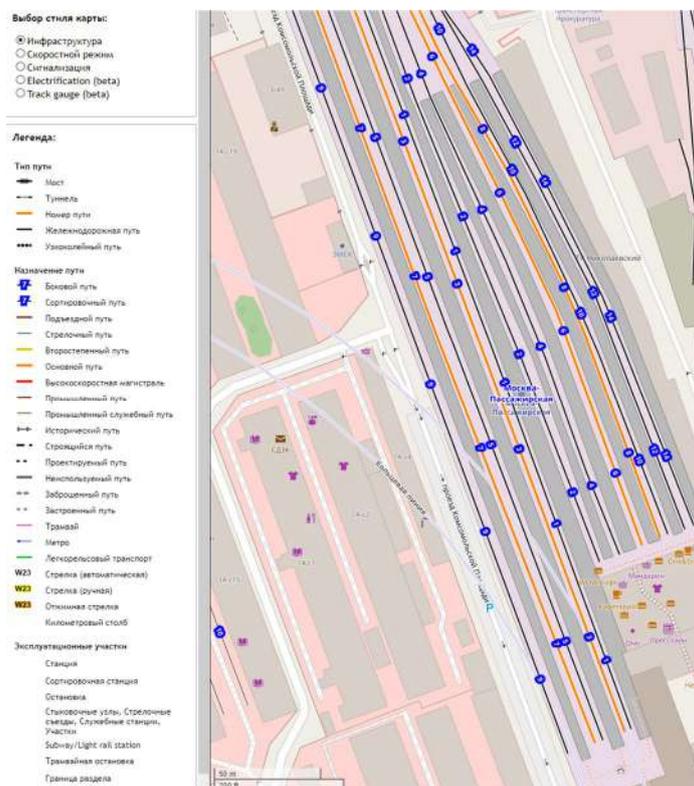


Рисунок 1 – Масштабная схема путевого развития станции Москва-Пассажирская из сервиса *OpenRailwayMap*. Номера путей нанесены в соответствии с обозначением на пассажирских платформах

Как видно из рисунка 1, на карте обозначены границы путей общего и необщего пользования, указаны конфигурация и назначение главных и станционных путей, их нумерация и название линий, к которым они относятся.

Помимо режима отображения инфраструктуры у сервиса имеется еще несколько режимов, на которых показываются скоростной режим, сигнализация (работает на сети *Deutsche Bahn* (Германия) и *VR Group* (Финляндия)), электрификация и ширина колеи. Стоит отметить достаточно высокую детализацию внесенных данных по инфраструктуре европейских и североамериканских железнодорожных инфраструктур, добавленных на *OSM* силами энтузиастов. Примеры изображений, получаемых в каждом из режимов работы в *OSM*, приведены на рисунках 2 и 3.

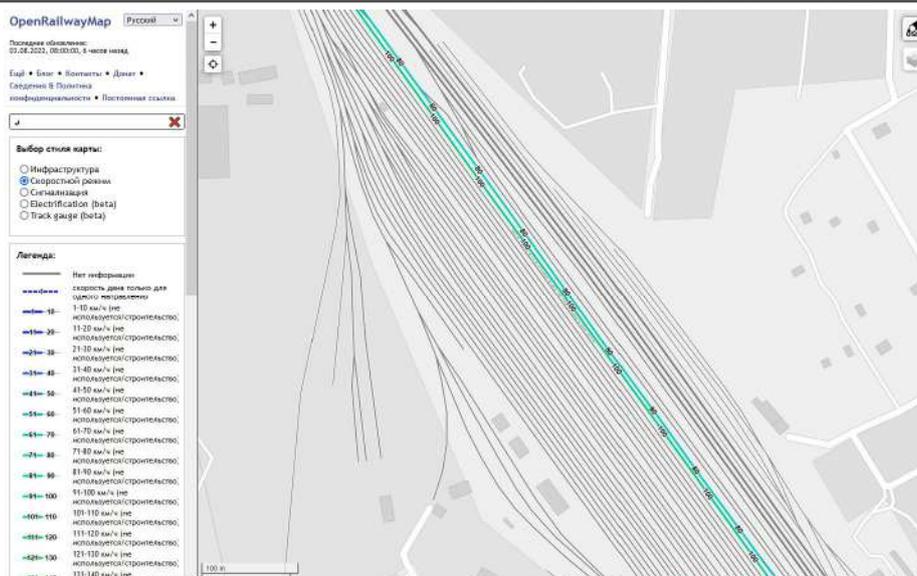


Рисунок 2 – Схема скоростного режима главных путей станции Воскресенск из сервиса *OpenRailwayMap*.

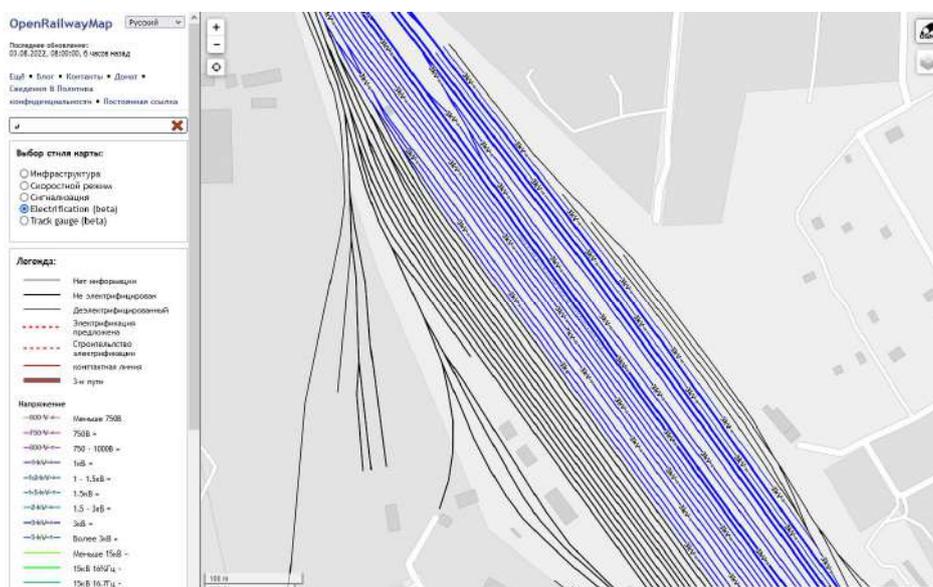


Рисунок 3 – Схема электрификации путей станции Воскресенск из сервиса *OpenRailwayMap*

Как видно из рисунка 2, максимальная скорость безостановочного проследования станции Воскресенск составляет 80 км/ч по пути «от Москвы» и 100 км/ч по пути «на Москву». Пример на рисунке 3 дает информацию о том, что станция Воскресенск электрифицирована постоянным током напряжением 3 кВ, при этом больше половины парка не имеет контактной сети.

Помимо сервиса *OpenRailwayMap* в прикладных задачах также возможно использование сервиса *Railway Routing* [10]. Данный портал работает аналогично автомобильному навигатору, но для расчета перемещений по железной дороге. На карте можно выставить две точки, и программа подберет оптимальный маршрут между ними по железнодорожным путям с учетом скоростного режима, ширины колеи, типа линии (можно исключить высокоскоростные) и электрификации. Помимо самой конфигурации маршрута утилита также выполняет калькуляцию времени в пути исходя из максимально разрешенной скорости и пройденного расстояния. Образец расчета маршрута представлен на рисунке 4.

Проприетарное использование и дальнейшие перспективы. Перечисленные выше сервисы при качественном наполнении данными сервиса *OSM* могут быть применены для глубокого и наглядного анализа любой железнодорожной инфраструктуры: укрупненного

подсчета пропускной способности участков, поиска путей оптимизации технологических процессов на станциях и участках линий, поиска возможностей по увеличению маршрутной скорости и многих других исследовательских задач. Важно отметить, что данным инструментом можно пользоваться всем желающим, а не только на коммерческих основаниях, что стимулирует появление независимых проектов цифровизации на транспорте, новых исследований и обоснованных должным образом предложений по развитию пассажирской и грузовой железнодорожной инфраструктуры.

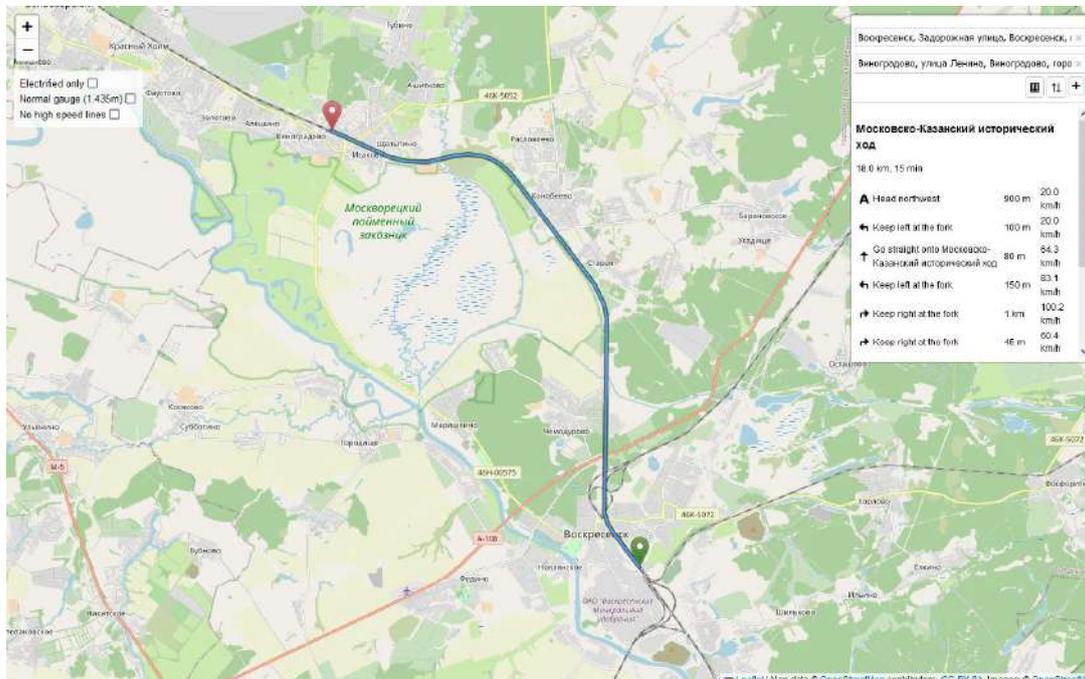


Рисунок 4 – Расчет маршрута с приемоотправочного пути станции Виноградово в транзитный парк станции Воскресенск в сервисе *Railway Route*

Цифровые модели и сервисы, описанные выше, были применены авторами статьи в ряде теоретических и практических исследований. Так, при расчете необходимого количества мест для ремонта и обслуживания подвижного состава в депо Центрального транспортного узла с целью определения пробега подвижного состава, в том числе по планирующимся новым маршрутам, был использован сервис *Railway Route*, автоматически показывающий километраж маршрута. Сервис *OpenRailwayMap* использовался авторами при необходимости быстрой визуализации мероприятий по развитию инфраструктуры: как отображение существующего положения, так и подоснова для отображения планируемых мероприятий по электрификации существующих, строительству новых станционных путей.

В настоящее время авторами выполняется разработка дополненного сведениями ограниченного доступа цифрового двойника Центрального транспортного узла. Геоинформационная модель размещена на локальном сервере и помимо общедоступных сведений содержит информацию о нумерации станционных путей, их назначении, наличии секционирования, ожидаемом сроке ввода в эксплуатацию (для планирующейся и строящейся инфраструктуры). Модель предполагается к использованию для быстрого анализа существующей на заданный срок инфраструктуры, в основном – для движения пригородных поездов (пути отстоя, оборота подвижного состава, тракционных путей моторвагонных депо и т. д.). Основное средство для просмотра и внесения изменений в модель на текущий момент – программа *QGIS (Quantum GIS)*, но планируется перенесение просмотра и визуализации данных в html-среду на основе стандартных решений для визуализации, например, *FlexGIS*.

Помимо имеющихся и находящихся в разработке сервисов открытых и закрытых для общего пользования имеется и ряд перспектив для дальнейшей разработки.

Весьма перспективным представляется выгрузка данных из *OSM* в корпоративные ГИС с целью дальнейшего анализа с полной или частичной автоматизацией. Наиболее перспективным технологическим решением здесь видится связка функционала широко используемой программы *QGIS (Quantum GIS)* и выгруженных из *OSM* данных, которые затем можно анализировать и обрабатывать практически неограниченным набором способов, например:

- 1) добавлять проприетарную информацию, защищенную коммерческой тайной, в локальную копию выгрузки из *OSM*;
- 2) анализировать количество и специализацию станционных путей, зависимость фактической вместимости станции от грузовой работы, определение целесообразности размещения пригородных поездов на отстой и многое другое.

Модель, дополненная коммерческой защищенной информацией, будет иметь значительно расширенный по сравнению с открытой функционал, позволяющий производить практически любой анализ, связанный с эксплуатацией железнодорожной инфраструктуры: выявление лимитирующих объектов, ограничивающих пропускную способность в масштабах полигона или узла, поиск и распределение мест отстоя и оборота пригородных поездов, анализ норм веса и длины грузовых поездов и т. д.

В перспективе насыщенную атрибутами модель некоторого железнодорожного полигона можно сделать ядром целой экосистемы использования топографических данных в режиме реального времени, например:

процесс управления перевозочным процессом с отображением текущей поездной обстановки на масштабной карте [11, 12];

управление жизненным циклом отдельных объектов инфраструктуры путем учета каждого передвижения подвижного состава по ним [13];

проведение всех видов маркетинговых исследований в грузовых и пассажирских перевозках [14, 15];

управление проектированием и строительством объектов железнодорожной инфраструктуры [16 – 18].

В результате выполнения работы по сбору и внесению открытых данных в ГИС *OSM* был создан пример возможной модели железнодорожной инфраструктуры Центрального транспортного узла (так называемый «цифровой двойник»), а также разработаны варианты ее использования, в том числе с добавлением локальной информации непубличного характера. Определены перспективы образования единой ГИС железнодорожного транспорта для создания на ее базе эксплуатационной модели полигона либо его произвольного фрагмента.

Список литературы

1. Цифровые цепи поставок и технологии на базе блокчейн в совместной экономике / В. П. Куприяновский, С. А. Синягов, А. А. Климов [и др.]. – Текст : непосредственный // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2017. – Т. 5. – № 8. – С. 80–95.
2. BIM на железных дорогах мира – развитие, примеры, стандарты / В. П. Куприяновский, О. Н. Покусаев, А. А. Климов [и др.]. – Текст : непосредственный // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2020. – Т. 8. – № 5. – С. 57–80.
3. Цифровая железная дорога – ERTMS, BIM, GIS, PLM и цифровые двойники / В. П. Куприяновский, В. В. Аленков, А. А. Климов [и др.]. – Текст : непосредственный // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. – 2017 – Т. 13. – № 3. – С. 129–166.
4. Технологии цифровых близнецов в транспортных коридорах для морских и водных путей в России / В. П. Куприяновский, А. А. Климов, И. Г. Гоц [и др.]. – Текст : непосредственный // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2020. – Т. 8. – № 12. – С. 113–132.
5. Цифровые двойники на базе развития технологий BIM, связанные онтологиями, 5G, IoT и смешанной реальностью для использования в инфраструктурных проектах и IFRABIM /

- В. П. Куприяновский, А. А. Климов, Ю. Н. Воропаев [и др.]. – Текст : непосредственный // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2020. – Т. 8. – № 3. – С. 55–74.
6. Веб-картографический проект OpenStreetMap // [openstreetmap.org](https://www.openstreetmap.org) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.openstreetmap.org> (дата обращения: 10.11.2022).
7. База знаний OpenStreetMap. // [wiki.openstreetmap.org](https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Main_Page) : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Main_Page (дата обращения: 10.11.2022).
8. Веб-картографический сервис железных дорог // openrailwaymap.org : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://openrailwaymap.org> (дата обращения: 10.11.2022).
9. Редактор Java OpenStreetMap // josm.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://josm.ru> (дата обращения: 10.11.2022).
10. Веб-сервис построения маршрутов по железным дорогам // [signal.eu.org](https://signal.eu.org/osm) : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://signal.eu.org/osm> (дата обращения: 10.11.2022).
11. О необходимости выбора параметров грузовых поездов, пропускаемых по головным участкам крупных транспортных узлов, в условиях высокой интенсивности движения пригородных и пригородно-городских электропоездов / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, А. А. Бакин [и др.]. – Текст : непосредственный // *Вестник транспорта Поволжья*. – 2021. – № 5 (89). – С. 31–36.
12. Колин, А. В. Подходы к повышению пропускной способности тупиковых пассажирских станций / А. В. Колин, А. А. Бакин. – Текст : непосредственный // *Транспорт Урала*. – 2021. – № 3 (70). – С. 28–32. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-3-28-32.
13. Дулин, С. К. Анализ требований к открытой системе генерализации железнодорожных карт / С. К. Дулин, Н. Г. Дулина. – Текст : непосредственный // *Наука и технологии железных дорог*. – 2022. – Т. 6. – № 1 (21). – С. 34–41.
14. Московский транспортный узел: перспективы развития / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Д. Ю. Роменский [и др.]. – Москва : Российский университет транспорта (МИИТ) ; ВИНТИ РАН, 2017. – 96 с. – Текст : непосредственный.
15. Санкт-Петербургский транспортный узел: перспективы развития / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Д. Ю. Роменский [и др.] Москва : Российский университет транспорта (МИИТ) ; ВИНТИ РАН, 2020. – 192 с. – Текст : непосредственный.
16. Вакуленко, С. П. Основы проектирования трехмерных динамических моделей железнодорожных станций / С. П. Вакуленко, А. К. Головнич. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2022. – 384 с. – Текст : непосредственный.
17. Вакуленко, С. П. Реконструкция станций с применением геоинформационных технологий / С. П. Вакуленко, П. В. Голубев, М. Ю. Телятинская. – Текст : непосредственный // *Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы : материалы Национальной научно-практической конференции, посвященной 125-летию РУТа (МИИТа), Москва, 29 сентября 2021 г.* – Москва : Российский университет транспорта, 2021. – С. 115–120.
18. Козлов, П. А. Методы исследования проектов развития объектов транспортной инфраструктуры / П. А. Козлов, С. П. Вакуленко, Н. Ю. Евреенова. – Текст : непосредственный // *Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки : труды международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 г.* – Москва : Российский университет транспорта, 2021. – С. 174–181. – DOI 10.47581/2022/Obrazcov.25.

References

1. Kupriyanovsky V.P., Sinyagov S.A., Klimov A.A. et al. Digital supply chains and blockchain-based technologies in a joint economy. *International Journal of Open Information Technologies*, 2017, vol. 5, no. 8, pp. 80-95 (In Russian).
2. Kupriyanovsky V.P., Pokusaev O.N., Klimov A.A. et al. BIM on the railways of the world – development, examples, standards. *International Journal of Open Information Technologies*, 2020, vol. 8, no. 5, pp. 57-80 (In Russian).

3. Kupriyanovsky V.P., Alenkov V.V., Klimov A.A., Sokolov I.A., Zazhigalkin A.V. Digital railway – ERTMS, BIM, GIS, PLM and digital twins. *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii i IT-obrazovanie – Modern Information Technologies and IT-Education*, 2017, vol. 13, no. 3, pp. 129-166 (In Russian).
4. Kupriyanovsky V.P., Klimov A.A., Gots I.G. et al. Digital twin technologies in transport corridors for sea and waterways in Russia. *International Journal of Open Information Technologies*, 2020, vol. 8, no. 12, pp. 113-132 (In Russian).
5. Kupriyanovsky V.P., Klimov A.A., Voropaev Yu.N. et al. Digital twins based on the development of BIM technologies, connected by ontologies, 5G, IoT and mixed reality for use in infrastructure projects and IFRABIM. *International Journal of Open Information Technologies*, 2020, vol. 8, no. 3, pp. 55-74 (In Russian).
6. *Veb-kartograficheskii proekt OpenStreetMap* [Web-mapping project OpenStreetMap]. Available at: <https://www.openstreetmap.org> (accessed 10.11.2022).
7. *Baza znaniy OpenStreetMap* [Knowledge Base OpenStreetMap]. Available at: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Main_Page (accessed 10.11.2022).
8. *Veb-kartograficheskii servis zheleznikh dorog* [Web-cartographic service of railways]. Available at: <https://openrailwaymap.org> (accessed 10.11.2022).
9. *Redaktor Java OpenStreetMap* [Java editor OpenStreetMap]. Available at: <https://josm.ru> (accessed 10.11.2022).
10. *Veb-servis postroeniia marshrutov po zheleznym dorogam* [Web service for constructing routes for railways]. Available at: <https://signal.eu.org/osm> (accessed 10.11.2022).
11. Vakulenko S.P., Kolin A.V., Bakin A.A. et al. On the need to select the parameters of freight trains passing through the head sections of large transport hubs in conditions of high traffic intensity of suburban and suburban-urban electric trains. *Vestnik transporta Povolzh'ia – Bulletin of transport of the Volga region*, 2021, no. 5 (89), pp. 31-36 (In Russian).
12. Kolin A.V., Bakin A.A. Approaches to increasing the capacity of dead-end passenger stations. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2021, no. 3 (70), pp. 28-32, DOI 10.20291/1815-9400-2021-3-28-32 (In Russian).
13. Dulin S.K., Dulina N.G. Analysis of the requirements for an open system of generalization of railway maps. *Nauka i tekhnologii zheleznikh dorog – Science and technology of railways*, 2022, vol. 6, no. 1 (21), pp. 34-41 (In Russian).
14. Vakulenko S.P., Kolin A.V., Romensky D.Yu. et al. *Moskovskii transportnyi uzel: perspektivy razvitiia* [Moscow transport hub: development prospects]. Moscow: Russian University of Transport (MIIT); All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences, 2017, 96 p. (In Russian).
15. Vakulenko S.P., Kolin A.V., Romensky D.Yu. et al. *Sankt-Peterburgskii transportnyi uzel: perspektivy razvitiia* [St. Petersburg transport hub: development prospects]. Moscow: Russian University of Transport (MIIT); All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences, 2020, 192 p. (In Russian).
16. Vakulenko S.P., Golovnich A.K. *Osnovy proektirovaniia trekhmernykh dinamicheskikh modelei zheleznodorozhnykh stantsii* [Basics of designing three-dimensional dynamic models of railway stations]. Moscow: Training and Methodological Center for Education in Railway Transport Publ., 2022, 384 p. (In Russian).
17. Vakulenko S.P., Golubev P.V., Telyatinskaya M.Yu. Reconstruction of stations using geoinformation technologies. *Tsifrovaia transformatsiia transporta: problemy i perspektivy: materialy natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Digital transformation of transport: problems and prospects: materials of the national scientific and practical conference]. Moscow, 2021, pp. 115-120 (In Russian).
18. Kozlov P.A., Vakulenko S.P., Evreenova N.Yu. Methods for researching projects for the development of transport infrastructure facilities. *Akademik Vladimir Nikolaevich Obraztsov – osnovopolozhnik transportnoi nauki: trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Academician Vladimir Nikolaevich Obraztsov – the founder of transport science: Proceedings of the International scientific and practical conference]. Moscow, 2021, pp. 174-181, DOI 10.47581/2022/Obrazcov.25. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Красильников Павел Андреевич

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, с. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Ассистент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 684-21-49.

E-mail: spjasshka@yandex.ru

Соколов Михаил Юрьевич

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, с. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Ассистент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 684-21-49.

E-mail: misha.u.sokolov@yandex.ru

Роменский Дмитрий Юрьевич

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, с. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 684-21-49.

E-mail: romenskiy@edu.rut-miit.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Красильников, П. А. Использование данных стандарта OpenStreetMap для задач, связанных с эксплуатацией железнодорожного транспорта / П. А. Красильников, М. Ю. Соколов, Д. Ю. Роменский. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 3 (55). – С. 44 – 54.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Krasilnikov Pavel Anrdeevich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9/9, Obraztsova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Assistant of the department «Transport business management and intelligent systems», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 684-21-49.

E-mail: spjasshka@yandex.ru

Sokolov Mikhail Yurievich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9/9, Obraztsova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Assistant of the department «Transport business management and intelligent systems», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 684-21-49.

E-mail: misha.u.sokolov@yandex.ru

Romenskiy Dmitriy Yurievich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9/9, Obraztsova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Transport business management and intelligent systems», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 684-21-49.

E-mail: romenskiy@edu.rut-miit.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Krasilnikov P.A., Sokolov M.Y., Romenskiy D.Y. Using OpenStreetMap data for rail transport. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 3 (55), pp. 44-54 (In Russian).

УДК 656.222.4

О. В. Шугаев

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), г. Новокузнецк, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ВЕЛИЧИНЫ УСТАНОВЛЕННОГО ТЕМПА ДВИЖЕНИЯ Поездов НА УЧАСТКЕ ПУТИ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ХАРАКТЕРА ВЕДЕНИЯ Поезда

Аннотация. Представленная публикация посвящена вопросам, связанным с закономерностью распределения отклонений скоростных характеристик от теоретической кривой движения. Работа

отражает ведение эмпирических изысканий в промышленной среде Талдинского погрузочно-транспортного управления. Статья отчасти использует базовые характеристики подвижного состава, локомотивов и формулы для ведения экстраполяции, частично мнение, составленные формулы и аналитический результат автора. Первая часть отражает определение данных, фигурирующих в ходе всего исследования, и используемой методологии, применимой для ответа на представленный к разрешению вопрос. В публикации особая значимость уделена обоснованию и анализу данных, выявленных в ходе проведения эксперимента и при статистической обработке. Статья отражает результаты теоретического расчета параметров движения и торможения поезда, основанные на методологии формулы Эйлера, позволяющие более точно экстраполировать характеристику скорости на указанном интервале. Часть массива публикации опирается на данные, полученные в ходе проведения исследований, с итоговым обоснованием, двухэтапного эксперимента, основанного на изучении скоростных характеристик в режиме движения с периодическими ускорениями и замедлением. Эмпирическая часть публикации основывается на исследовании лент скоростемера, локомотивного парка, курсирующего между станциями Погрузочная 1 – Погрузочная 2 ООО «Талдинское погрузочно-транспортное управление». Представляется статистическая обработка данных, характеристики случайной величины первого и второго порядков и вид распространения случайной величины отклонения расчетных изысканий движения и замедления поезда от эмпирических исследований кривой движения. В итоговой части работы определены и обоснованы законы распределения случайной величины отклонения параметров движения от принятых теоретических изысканий, позволяющих скорректировать интервал движения для системы кодово-локационного позиционирования подвижного состава.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, метод Эйлера, экстраполяция данных движения, распределение случайной величины, интервальное регулирование, статистическая обработка параметров движения, эмпирические изыскания параметров движения, система кодово-локационного позиционирования подвижного состава.

Oleg V. Shugaev

Siberian State Industrial University (SSIU), Novokuznetsk, the Russian Federation

DETERMINATION OF THE REGULARITY OF THE DISTRIBUTION OF DEVIATIONS IN THE VALUE OF THE SET TRAIN SPEED ON A SECTION OF TRACK WITH AN AUTOMATIC INTERVAL CONTROL SYSTEM WHEN EXPOSED TO THE ENVIRONMENT AND THE NATURE OF THE TRAIN

Abstract. The presented publication is devoted to issues related to the regularity of the distribution of deviations of speed characteristics from the theoretical curve of motion. The work reflects the conduct of empirical research in the industrial environment of the Talda Loading and Transport Department. The article partly uses the basic characteristics of rolling stock, locomotives and formulas for conducting extrapolation, partly the opinion, compiled formulas and the analytical result of the author. The first part reflects the definition of the data appearing throughout the study and the methodology used to answer the question submitted for resolution. The publication pays special attention to the substantiation and analysis of the data revealed during the experiment and during statistical processing. The article reflects the results of the theoretical calculation of the parameters of movement and braking of the train, based on the methodology of the Euler formula, allowing more accurately extrapolating the speed characteristic at the specified interval. Part of the publication's array is based on the data obtained during the research, with the final justification, of a two-stage experiment based on the study of speed characteristics in the mode of motion with periodic acceleration and deceleration. The empirical part of the publication is based on the study of the speed gauge tapes, a locomotive fleet plying between the Loading 1 – Loading 2 stations of the «Taldinsky Loading and Transport Management» LLC. Statistical data processing, characteristics of a random variable of the first and second orders and the type of propagation of a random variable deviation of the calculated surveys of movement and deceleration of the train from empirical studies of the motion curve are presented. In the final part of the work, the laws of the distribution of the random value of the deviation of the motion parameters from the accepted theoretical studies are determined and justified, allowing to adjust the interval of movement for the system of code-location positioning of rolling stock.

Keywords: railway transport, Euler method, extrapolating movement, statistical analysis, interval control, statistical processing of motion parameters, empirical studies of motion parameters, code-location positioning system for rolling stock non-branched track circuits.

Глобальный рост промышленности способствует интенсивному использованию путей сообщения и, как следствие, повышает загруженность железнодорожных линий как в попутном следовании, так и смешанного типа. Минимальное межпоездное расстояние определяет безопасность следования и пропускную способность используемого участка.

Системы интервального регулирования, разработанные и введенные в эксплуатацию на базе стационарных блок-участков, не располагают гибкой структурой, способствующей подстроиться к современным темпам следования и объемам перевозок. Для реализации требуемых размеров движения стоит выбор, основанный на расширении сетей железных дорог либо на совершенствовании типа системы, организующей интервальное регулирование, обеспечивающей повышение пропускной способности на должном уровне безопасности.

С экономической точки зрения расширение сетей железных дорог требует значительных затрат, связанных с изысканием, проектированием, земляными работами, работами по прокладке сетей сообщения и путевого хозяйства, тем более что дополнительные пути включают в себя затраты на периодическое обслуживание и содержание. Наиболее выгодным решением для вопроса реализации требуемых размеров движения являются действия, направленные на повышение эффективности используемых путей сообщения, что достигается внедрением системы кодово-локационного позиционирования подвижного состава (СКЛППС) [1] на участке следования. Представленная система интервального регулирования способствует сокращению межпоездной дистанции до значения тормозного пути. На основании этого более точное определение тормозного пути напрямую связано с безопасностью попутно следующих поездов, при этом от скорости обработки данных зависит продолжительность межпоездного интервала в попутном направлении. Процесс определения предельных дистанций замедления поезда в условиях использования альтернативных технологий по организации движения на перегоне требует соответствующего инструментария, регламентирующего движение на перегоне, скоростных ограничений и межпоездной дистанции для обеспечения соответствующего уровня безопасности и предельных скоростей обработки данных с оптимальной точностью. Для успешного функционирования системы необходимы прогнозирование и опережающие действия по определению подлинности показаний, определяемых расчетным путем, вычисляемых заблаговременно до применения торможения, с целью сокращения межпоездного интервала до предельных значений.

Учитывая изложенное выше, требуется разработать оптимальный метод оценки флуктуирующих показателей скорости и проверить эффективность, определив законы распределения величины случайного отклонения расчетного тормозного пути от действительного значения протяженности участка остановки поезда в режиме искусственного замедления.

Для этого необходимо произвести следующее:

разработать оптимальный метод систематизации флуктуирующих скоростных показателей;

произвести теоретический расчет параметров движения и торможения поезда, выбрав полученные результаты за математическое ожидание стохастических отклонений действительных результатов;

провести эксперимент, основанный на изучении скоростных характеристик в режиме движения с периодическими ускорениями и замедлением, обосновать данные, полученные в ходе эксперимента;

выявить вид распределения случайной величины отклонения расчетного тормозного интервала от действительного значения и границы разброса данных.

В качестве объекта исследования выступает тормозной путь поезда с локомотивом марки 2ТЭ10В, определяемый расчетным и натурным путем при движении поезда по перегону между станциями Погрузочная 1 – Погрузочная 2. Предметом исследования является случайная величина отклонения расчетного тормозного интервала от действительного значения остановочного пути. Научная новизна представленной работы состоит в разработке метода систематизации флуктуирующих скоростных показателей, учитывающего погрешность экстраполяции данных расчетным способом.

Протяженность пути следования рассматриваемого расстояния, на основании технико-распорядительного акта железнодорожного пути необщего пользования (ЖДПНП) ООО «Талдинское ПТУ» составляет 5,78 км. Эксперимент проводился с груженым маршрутным поездом, в состав которого включались четырехосные универсальные полувагоны типа 12-1704. Характеристики, определяющие тормозной путь используемого подвижного состава и поезда на основании рекомендаций работ [2 – 4], представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики полувагонов типа 12–1704 и локомотива 2ТЭ10В

Локомотив 2ТЭ10В						
вес, т	осевая нагрузка, т	длина локомотива, м	сила тяги, Н		скорость, км/ч	
			при трогании	расчетная	конструкционная	расчетная
276	23	33	797280,65	496216,49	100	23,4
Полувагоны типа 12-1704						
тара, т	осевая нагрузка, т	длина, м	объем кузова, м ³	грузоподъемность, т		
23,8	23,5	13,92	88	69		

Перегон между станциями Погрузочная 1 – Погрузочная 2 располагается в Прокопьевском районе Кемеровской области.

Для проведения эксперимента требуется произвести теоретические изыскания по построению кривой скорости, зависящей от расстояния и времени и характеризующей идеальное движение по представленному участку. Продольный профиль рассматриваемого перегона отображен на рисунке 1, информация о построении взята согласно технической документации ЖДПНП ООО «Талдинское ПТУ». Основываясь на приведенных данных, можно сделать следующее заключение: профиль пути имеет затяжной подъем с достаточно крутым уклоном, достигающим в некоторых местах значения 19,27 ‰, при этом он включает в себя кривые разного радиуса, достигающие 310 м.

Представленный участок пути требует высокого тягового усилия для выхода на расчетную скорость, а для более точной оценки тормозного пути требуется более протяженная кривая, достигаемая увеличением скоростных показателей. Руководствуясь условием эксперимента, принято использовать минимальное количество груженых вагонов и тепловоз 2ТЭ10В, чья итоговая тяговая подвижная система, состоящая из двух секций с суммарным весом 276 т, способна вывести груженный состав из 20 вагонов до скоростной отметки 50 км/ч.

Теоретические изыскания параметров движения и торможения поезда основаны на расчетном методе проектирования при использовании формулы Эйлера [5], позволяющей достаточно точно экстраполировать данные по ведению представленного поезда. Итоговый вид формулы, решающей задачу прогнозирования величины приращения скорости от длины участка на основании работ [5, 6]:

$$\Delta V = \frac{\Delta S \cdot (F_T - W - b_T)}{4,17}, \text{ км/ч}, \quad (1)$$

где ΔS – длина рассматриваемого участка, м;

W – общее удельное внешнее сопротивление движению, включающее в себя воздействие от уклона и прохождения криволинейного участка пути, Н/кН;

b_T – удельная тормозная сила в момент служебного торможения, Н/кН;

F_T – удельная сила тяги, Н/кН.

Фиксация конечной скорости движения, определяемая в конце рассматриваемого участка i , становится неразрешима без применения радикала, на основании работы [6] она примет вид:

$$V_{ki} = \sqrt{V_{ni}^2 + (\pm \Delta V_i)}, \text{ км/ч}, \quad (2)$$

где V_{ni} – начальная скорость для рассматриваемого i -го участка, км/ч.

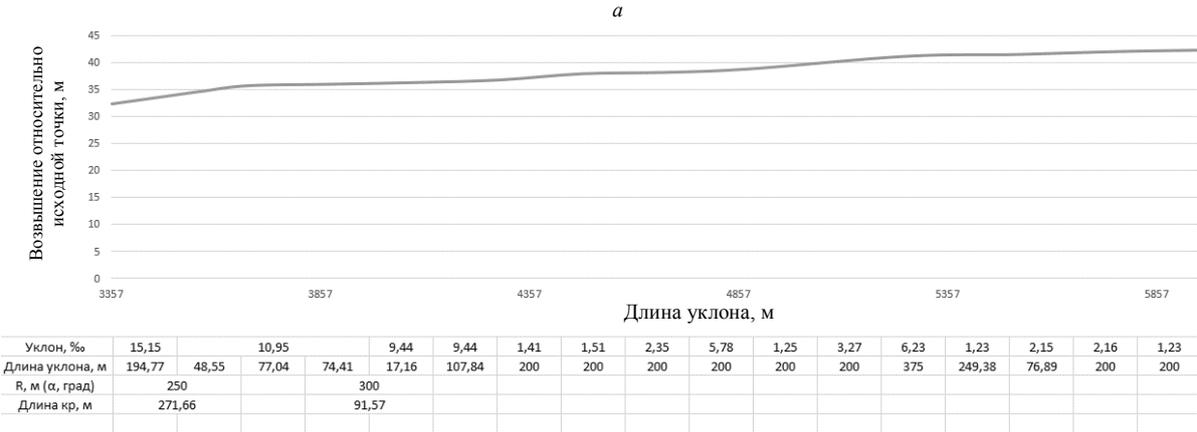
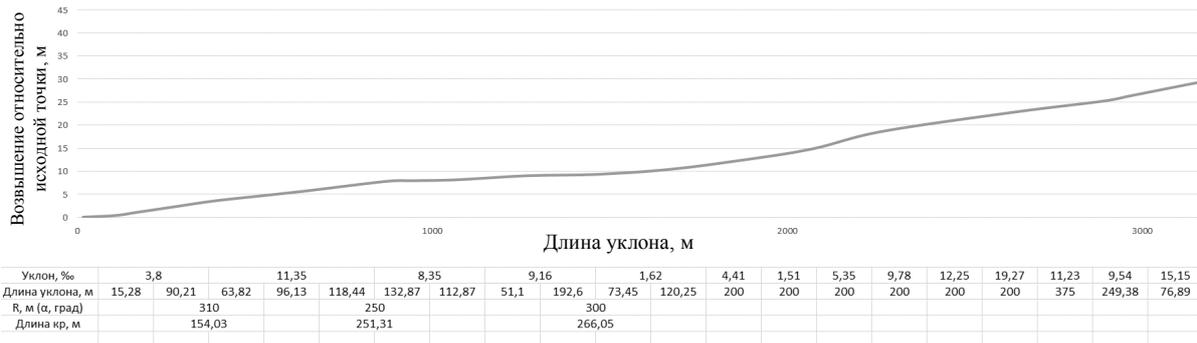


Рисунок 1 – Продольный профиль перегона Погрузочная 1 – Погрузочная 2

Для проведения эмпирических изысканий используются аналогичная марка локомотива 2ТЭ10В и группа груженых полувагонов типа 12-1704 с соответствующей общей массой в количестве 20 штук. С целью сохранения действующего промышленного процесса и сокращения убытков по проведению эксперимента принято решение выполнять изыскания в технологические окна. Для получения оптимальных достоверных данных с учетом допустимых затрат на проведение эмпирических опытов количество экспериментов сводится к 20. Данное количество экспериментов позволит сформировать представление о законе распределения случайной величины отклонений установленного темпа движения поездного маршрута при воздействии второстепенных факторов и характера ведения поезда на перегоне Погрузочная 1 – Погрузочная 2. Участок пути, связывающий указанные станции, оборудован полуавтоматической блокировкой, согласно которой при проведении эксперимента перегон будет закрыт для отправки следующего поезда. Достоверность полученных данных подтверждается наличием действующего поверенного скоростемера, расположенного в кабине локомотива и являющегося основным источником информации по проводимым изысканиям.

С целью обработки представленных данных и выделения необходимой информации принято решение об использовании элементов математической статистики с выделением на каждом исследуемом участке вариационного ряда размером 20 единиц, характеризующего ансамбль реализаций, полученный в ходе эмпирических изысканий, проводимых в равных условиях. Для каждого вариационного ряда составляется среднее квадратическое отклонение и определяется относительная частота появления значений с соответствующим интервалом квадратичных значений. Для простоты выведения полученных результатов принято решение о представлении двух диаграмм, соответствующих кривым движения и торможения. Данные о среднее квадратическом отклонении и относительной частоте на каждом шаге позволят визуально определить закон распределения случайной величины. Определение значения среднее квадратического отклонения i -го участка, на основе данных работ [8, 9], выполняется по формуле:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (V_{kij} - V_{ki})^2}, \quad (3)$$

где n – количество реализаций результата эмпирического изыскания;

V_{kij} – конечная скорость для рассматриваемого i -го участка j -й реализации, км/ч.

Определение величины относительной частоты появления соответствующей реализации, инъективной конкретному интервалу отклонения, рассчитывается по формуле:

$$\omega_l = \frac{n_l}{n}, \quad (4)$$

где n_l – количество реализаций, инъективных конкретному интервалу отклонения.

Математически рассчитываемые показатели движения качественно отличаются от действительных. С целью обеспечения безопасности допустимого интервала движения вводится значение корректирующего коэффициента, позволяющего повысить точность теоретического расчета через эмпирические данные. Корректирующий коэффициент определяется на основании усредненных данных распределения случайной величины отклонения параметра скорости от значения теоретических изысканий согласно формуле:

$$\Delta k = \frac{l \cdot \sigma_i \cdot V_{ki}^c + \rho}{V_{ki}}, \quad (5)$$

где l – наивысший разряд среднеквадратического отклонения, округленного до большего значения;

V_{ki}^c – конечная средняя скорость для рассматриваемого i -го участка, км/ч;

ρ – погрешность измерения скоростемера, км/ч.

$$l \approx \frac{V_k^M - V_{ki}}{\sigma_i}, \quad (6)$$

где V_k^M – наибольшее отклонение конечной скорости от расчетной для перегона, км/ч.

Изыскания параметров движения и торможения поезда проводятся на основании формул (1) – (6), а также определения промежуточных значений для ведения расчетов на основании работы [6] с применением информационной среды Microsoft Excel. В качестве исходных данных были использованы транспонированные в виде столбца параметры продольного профиля. Расчетными данными являются сила торможения, сила тяги, общее внешнее сопротивление поезда и их составляющие, зависящие от уклона и кривизны профиля, величина приращения скорости от длины участка и ее итоговое значение для i -го участка пути. Данная методика выбрана с целью получения более точной оценки промежуточных скоростных характеристик относительно длины пути.

Теоретический расчет основывается на использовании тяговой характеристики принятого оптимальным для исследования тепловоза марки 2ТЭ10В, представленной на рисунке 2 [4]. Представленная графическая характеристика непригодна для ведения предполагаемых расчетов. С целью удобства изыскания параметров движения и их автоматизации основные дискретные тяговые параметры рассматриваемого локомотива переведены в математический вид, на основании чего промежуточные значения получены интерполяционным методом прогнозирования данных.

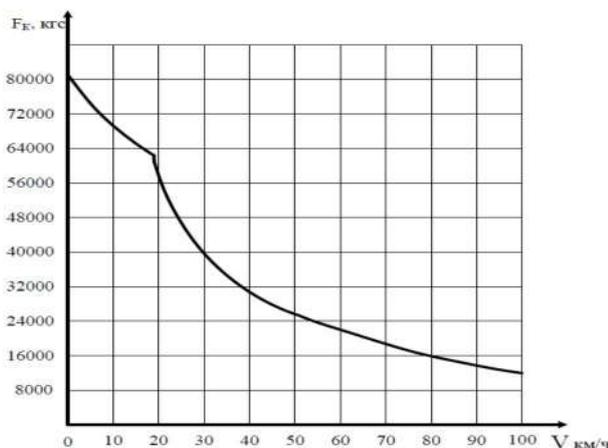


Рисунок 2 – Тяговая характеристика тепловоза 2ТЭ10В

Представленная таблица с тяговыми характеристиками локомотива 2ТЭ10В включает в себя основные параметры для ведения изыскания, связанного с экстраполированием данных движения поезда, включая, в свою очередь, вес поезда и удельную силу тяги.

Фрагмент результатов итоговых расчетов, проводимых для действующего рассматриваемого участка, представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты теоретических изысканий по перегону Погрузочная 1 – Погрузочная 2 с применением группы вагонов типа 12-1704 в количестве 20 шт. и локомотива 2ТЭ10В

№, п/п	Подъем, %	Длина, м	Радиус, м	Длина, м	b_T , Н/кН	$F_{ТЯГ}$, Н/кН	W_2 , Н/кН	W_i , Н/кН	W_r , Н/кН	W' , Н/кН	W'' , Н/кН	V_k , км/ч	W_{ox} , Н/кН
1	+3,8	15,28			0,00	38,24	4,77	3,80	0,00	1,90	0,83	0,00	0,97
2	+3,8	90,21	310	154,03	0,00	32,77	7,23	3,80	2,26	3,04	0,89	11,07	1,17
3	+11,35	63,82	310	154,03	0,00	21,79	15,10	11,35	2,26	4,70	1,02	25,98	1,49
4	+11,35	96,13			0,00	20,07	12,89	11,35	0,00	4,92	1,04	27,89	1,54
5	+11,35	118,44	250	251,31	0,00	18,34	15,76	11,35	2,80	5,25	1,07	30,71	1,61
6	+8,35	132,87	250	251,31	0,00	18,34	12,79	8,35	2,80	5,39	1,08	31,88	1,64
7	+8,35	112,87			0,00	17,33	10,06	8,35	0,00	5,71	1,11	34,55	1,71
8	+9,16	51,1			0,00	16,31	10,94	9,16	0,00	6,05	1,14	37,29	1,78
9	+9,16	192,6	300	266,05	0,00	15,37	10,96	9,16	0,00	6,15	1,15	38,16	1,80
10	+1,62	73,45	300	266,05	0,00	14,42	3,49	1,62	0,00	6,47	1,19	40,74	1,87
...
41	+1,23	200			0,00	0,00	2,77	1,23	0,00	5,11	1,01	24,90	1,54

С целью упрощения визуализации итоговых параметров принято решение опустить некоторые промежуточные значения, не зависящие от основных переменных. Расчеты включают в себя удельные силы торможения (b_T), тяги ($F_{ТЯГ}$), общую внешнюю силу сопротивления движению (W), включающую в себя воздействие от кривой (W_r), от уклона (W_i), а также общих сил, возникающих от ведения самого подвижного состава (W_{ox}) и состоящих из сопротивления движению локомотива (W') и вагонов (W''), а также приращения скорости и итогового скоростного режима в конце рассматриваемого участка. Для простоты вычислений принята стандартная система измерений (Н).

С целью построения кривой движения в оптимальных условиях принято решение использовать для торможения благоприятный прямолинейный участок, содержащий минимальный уклон (№ 27–41). Рассматриваемое утверждение обуславливается возможностью безопасной остановки и свободного трогания с места после замедления. На основании представленных требований модель движения поезда принимает следующий вид: поезд идет в режиме тяги до достижения требуемой скоростной отметки 50 км/ч, далее подвижной состав поддерживает скоростной режим путем комбинирования тяги и холостого хода, по выходу состава на рассматриваемый участок выбирается наименьший уклон и выполняется служебное торможение до полной остановки. С целью проверки состава на возможность дальнейшего движения после достижения скоростной отметки 0 км/ч поезд снова набирает скорость, требуемую для входа состава на станцию, с дальнейшим ее поддержанием.

Кривая изменения скорости при движении по перегону, составленная на основании таблицы 2, представлена на рисунке 3. С целью более точной визуализации данных, связанных с торможением поезда, соответствующий график вынесен в отдельный рисунок 4, составленный на основании действительных расчетов, но с дополнительным разбиением участков движения на отрезки длиной 25 м.

Теоретические изыскания по предлагаемой модели движения на рассматриваемом перегоне Погрузочная 1 – Погрузочная 2 показывают положительные результаты. Поезд после полной остановки способен начать движение. В связи с наличием достаточно большого

подъема на участке следования поезд в режиме тяги испытывает уменьшение скорости в середине пути, но со временем выходит на требуемую скорость и выполняет служебное торможение протяженностью 1104 м. Участок № 29 поезд проходит на холостом ходу, наличие которого обуславливается возможностью совмещения кривых движения, полученных эмпирическим путем, и теоретического изыскания. Представленная модель движения будет использоваться для получения действительных данных опытным путем в качестве руководства по ведению поезда.

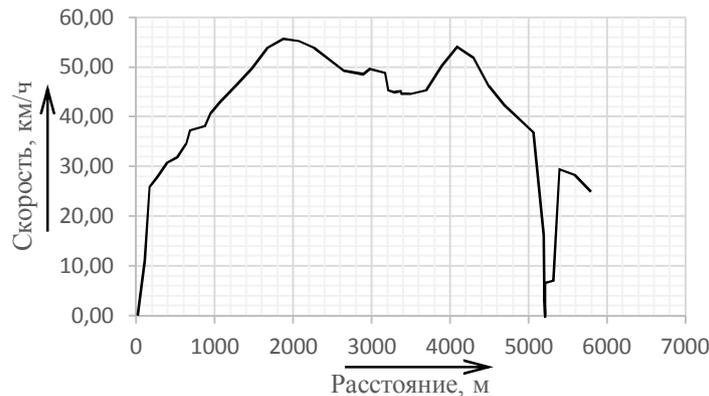


Рисунок 3 – Кривая изменения скорости при движении по перегону Погрузочная 1 – Погрузочная 2 с применением группы вагонов типа 12-1704 в количестве 20 шт. и локомотива 2ТЭ10В

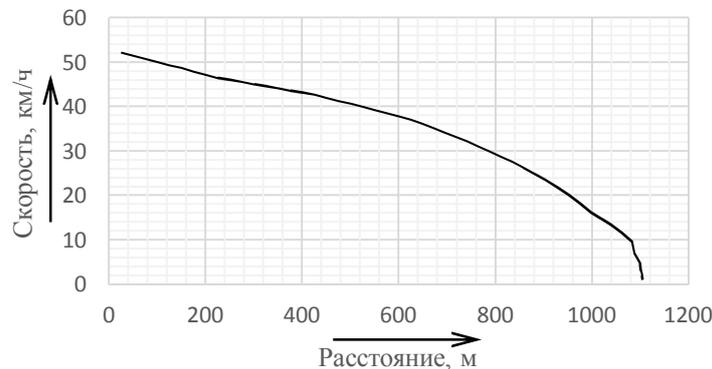


Рисунок 4 – Кривая торможения поезда с применением группы вагонов типа 12-1704 в количестве 20 шт. и локомотива 2ТЭ10В на моделируемом участке

Фрагменты результатов эмпирических изысканий, проводимых в несколько этапов, представлены в таблицах 3 и 4. Два этапа обуславливались применением разных локомотивных бригад для ведения поезда, разнородных исследовательских периодов времени, проводимых в дневные и ночные смены. Данные по проводимым испытаниям ранжированы в соответствии с номером испытания в порядке возрастания, первые колонки таблиц 3, 4 отражают исходные данные – уклон и длину рассматриваемого участка – и результаты теоретических изысканий с целью их сравнения с полученными данными. Буквой «N» обозначены расчетные скоростные показатели для конкретного участка. Каждая из ячеек отражает конечную скорость в начале представленного участка движения. Таблицы 3, 4 разделены на несколько частей, первая из которых отражает движение поезда в сочетании режимов тяги и холостого хода, а вторая часть разбита на минимальные путевые интервалы, позволяющие сделать более детальную оценку полученных результатов в режиме торможения. Данные, вошедшие в таблицы 3 и 4, снимались на основании ленты скоростемера с погрешностью 1 %.

Управление процессами перевозок

Таблица 3 – Результаты первого этапа эмпирических изысканий по перегону Погрузочная 1 – Погрузочная 2 с применением группы вагонов типа 12-1704 в количестве 20 шт. и локомотива 2ТЭ10В

№, п/п	i, %	S, м	N, км/ч	Результаты эмпирических изысканий, км/ч									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	+3,8	15,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	+3,8	90,2	11,1	11,4	11,5	9,3	11,8	10,7	10,8	10,3	12,7	9,1	11,5
3	+11,4	63,8	26,0	26,1	26,3	26,1	24,3	25,4	25,1	26,3	27,1	26,1	25,8
...
17	+19,3	200	53,9	52,5	55,8	52,7	53,5	54,8	53,4	52,8	52,1	52,6	53,2
1	+5,8	25,0	52,2	52,6	54,1	52,6	52,3	51,9	51,5	51,1	50,7	53,9	52,7
2	+5,8	25,0	51,5	51,1	53,1	48,5	49,9	52,3	51,3	48,9	50,1	54,3	50,1
3	+5,8	25,0	50,8	48,8	48,7	51,6	49,1	49,6	52,1	48,7	52,5	52,0	51,5
...
52	+1,2	1,4	0,9	1,9	2,1	2,9	0,2	0,3	0,6	1,0	0,5	0,8	1,1

Таблица 4 – Результаты второго этапа эмпирических изысканий по перегону Погрузочная 1 – Погрузочная 2 с применением группы вагонов типа 12-1704 в количестве 20 шт. и локомотива 2ТЭ10В

№	i, %	S, м	N, км/ч	Результаты эмпирических изысканий, км/ч									
				11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	+3,8	15,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	+3,8	90,2	11,1	11,3	11,1	10,2	9,5	12,3	10,1	9,9	9,4	11,3	8,8
3	+11,4	63,8	26,0	25,3	24,4	24,6	25,7	26,6	27,8	27,0	26,3	24,0	26,3
...
17	+19,3	200	53,9	53,8	54,8	55,0	52,1	55,6	53,4	52,9	52,4	53,7	52,3
1	+5,8	25,0	52,2	51,5	51,0	53,0	51,9	50,5	52,2	52,6	50,1	53,2	51,3
2	+5,8	25,0	51,5	51,9	50,9	50,0	52,2	51,2	51,4	52,3	50,5	50,9	51,8
3	+5,8	25,0	50,8	52,9	47,8	51,9	50,1	47,9	50,6	51,0	52,1	51,8	49,8
...
52	+1,2	1,4	0,9	2,2	1,4	1,2	1,3	0,5	1,5	0,2	0,9	0,9	0,4

Согласно полученным в ходе двухэтапного эмпирического исследования данным выделены основные показатели первого и второго порядка, характеризующие случайные скоростные отклонения. На основании полученных результатов составлен график (рисунок 5), отражающий теоретические значения показателей минимального и максимального разброса значений случайной величины, определяющие конечную скорость, а также данные, скорректированные на величину дисперсии. В качестве математического ожидания приняты данные, полученные в ходе теоретического расчета.

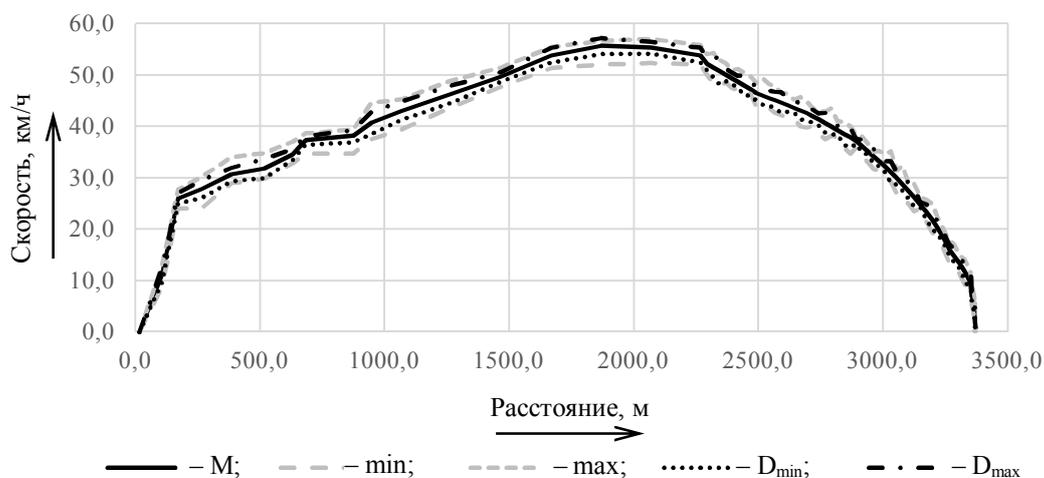


Рисунок 5 – Характеристики величины отклонения скорости от кривой движения, определенной при теоретическом изыскании: M – скоростные показатели, полученные в ходе теоретического расчета; min – наименьшие скоростные показатели, полученные в ходе эмпирического изыскания; max – наибольшие скоростные показатели, полученные в ходе эмпирического изыскания; D_{min}, D_{max} – границы разброса показателей второго порядка

На основе анализа графических характеристик величины отклонения скорости от кривой движения, представленных на рисунке 5, можно сделать следующие выводы: разброс данных в значительной степени наблюдается с повышением скорости. Логично предположить, что по мере возрастания производной внешние силы более интенсивно воздействуют на подвижной состав, особенно это связано с теми, которые по своей особенности не учитываются в тяговых расчетах. Ломаные реализации линий обуславливаются допустимой погрешностью скоростемера, которая также возрастает при наборе скорости. пилообразное отображение кривой торможения обуславливается разбиением участка торможения на более короткие исследуемые интервалы. В совокупности с большим объемом обрабатываемых данных и имеющейся погрешностью оборудования возникает наблюдаемый эффект, но несмотря на это кривые, скорректированные на величину дисперсии, позволяют сгладить полученный ансамбль реализаций.

Согласно данным, представленным в таблицах 3 и 4, составлена таблица 5, отражающая результаты определения среднеквадратического отклонения случайной величины конечной скорости конкретных участков движения и относительной частоты появления соответствующего значения относительно интервала квадратичных значений. Для удобства и простоты расчетов было принято решение разбить возможные отклонения случайной величины на восемь частей, соответствующих указанному значению среднеквадратического отклонения для конкретного участка.

Таблица 5 – Результаты определения среднеквадратического отклонения случайной и относительной частоты появления соответствующего значения относительно интервала

№ п/п	Длина интервала, м	Среднеквадратическое отклонение σ	Относительная частота реализации, появляющаяся в интервале квадратичного отклонения							
			$-4\sigma; -3\sigma$	$-3\sigma; -2\sigma$	$-2\sigma; -1\sigma$	$-1\sigma; 0$	$0; 1\sigma$	$1\sigma; 2\sigma$	$2\sigma; 3\sigma$	$3\sigma; 4\sigma$
1	15,3	0,0	0	0,05	0,25	0,25	0,35	0,1	0	0
...
17	200,0	1,2	0	0	0,2	0,3	0,4	0,1	0	0
1	25,0	1,1	0	0,05	0,15	0,45	0,25	0,05	0,05	0
2	25,0	1,4	0	0	0,3	0,2	0,4	0,1	0	0
3	25,0	1,6	0	0	0,1	0,35	0,25	0,25	0,05	0
...
52	1,4	0,7	0	0,05	0,25	0,25	0,35	0,1	0	0

Детальную оценку закона распределения случайной величины отклонения параметра скорости от значения теоретических изысканий можно получить при усреднении результатов. Для этого все результаты, входящие в промежуток среднеквадратического отклонения, суммируются и делятся на количество входящих относительных частот выборок. Результат проделанного усреднения данных представлен на рисунке 6.

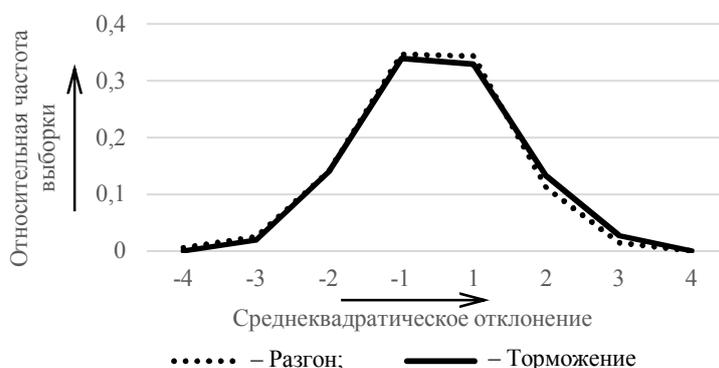


Рисунок 6 – Диаграммы усреднения данных распределения случайной величины отклонения параметра скорости от значения теоретических изысканий

После проведения обработки данных полученные результаты можно прокомментировать следующим образом. Основная масса случайных величин отклонения параметра скорости от значения теоретических изысканий как в режиме регулировочного движения с ускорением, так и при замедлении сосредоточена в центральной области представленного графика. Распространение фронта уменьшения значения относительной частоты выборки направлено по параболической траектории с полным ее отсутствием в точках 4σ и -4σ , незначительная концентрация наблюдается в точках 3σ и -3σ . Руководствуясь законами распределения случайных величин, представленными в источниках [10, 11], можно предположить, что архитектура начертания и характер распределения исследуемых величин соответствуют нормальному распределению Гаусса. Таким образом, оперируя данными графика, можно определить допустимый безопасный интервал движения при использовании системы СКЛППС. В результате исследования на основании данных графика, представленного на рисунке 6, выявлен корректирующий коэффициент для тормозной кривой, равный 0,120045167.

Подводя итоги выполненных теоретических и эмпирических исследований, можно сделать следующие выводы. Первая часть исследования посвящена определению исходных данных и разработке оптимального метода оценки флуктуирующих показателей скорости. Во второй части исследования произведен теоретический расчет параметров движения и торможения поезда, полученные результаты приняты за математическое ожидание стохастических отклонений от данных, определенных в ходе эмпирических изысканий. В третьей части исследования предложен альтернативный метод оценки флуктуирующих величин скорости на участке движения, основанный на сопоставлении разброса данных относительно кривой движения, реализованной математическим прогнозированием. Итогом всего исследования являются разработка оптимального метода оценки флуктуирующих показателей скорости и его проверка на действующем участке движения с получением соответствующих данных о характере флуктуирования скоростных показателей и их допустимых границах.

Таким образом, были выполнены разработка оптимального метода оценки флуктуирующих показателей скорости и проверка эффективности при определении законов распределения величины случайного отклонения расчетного тормозного пути от действительного значения протяженности участка остановки поезда в режиме искусственного замедления. В результате величина отклонения скоростных характеристик принимает значения, позволяющие скорректировать относительную погрешность при определении тормозного пути поезда. В случае применения на рассмотренном перегоне СКЛППС интервал следования поездов сократится до значения тормозного пути, определяемого при использовании значения корректирующего коэффициента 0,120045167, рассчитанного по предлагаемой методике. При установлении соответствующих зависимостей скоростных отклонений от расчетных межпоездной интервал станет более коротким, стабильным и безопасным.

Список литературы

1. Патент № 2801753 Российская Федерация, МПК В61L 23/16 (2006.01). Система кодово-локационного позиционирования подвижного состава на разветвленных и неразветвленных рельсовых цепях : № 2021110248 : заявлено 12.04.2021 : опубликовано 15.08.2023 / Шугаев О. В., Фомин Е. В., Воскресенская Т. П. – 19 с.: ил. – Текст : непосредственный.
2. Быков, Б. В. Конструкция механической части вагонов : учебное пособие / Б. В. Быков, В. Ф. Куликов. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2016. – 247 с. – Текст : непосредственный.
3. Раков, В. А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав / В. А. Раков. – Москва : Транспорт, 1979. – 213 с. – Текст : непосредственный.

4. Квашнина, Е. В. Тяговые расчеты на подъездном пути промышленного предприятия : методические указания / Е. В. Квашнина, М. Г. Дружинина. – Новокузнецк : Сибирский гос. индустр. ун-т, 2017. – 54 с. – Текст : непосредственный.
5. Абляимов, О. С. Уравнение движения поезда и некоторые методы его решения / О. С. Абляимов. – Текст : электронный // Universum: технические науки. – 2020. – № 9 (78). – URL: <https://universum.com/ru/tech/archive/item/10715> (дата обращения: 04.06.2021).
6. Бахолдин, В. И. Основы локомотивной тяги : учебное пособие / В. И. Бахолдин, Г. С. Афонин, Д. Н. Курилкин. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. – 308 с. – Текст : непосредственный.
7. Кильдишов, В. Д. Использование приложения MS Excel для моделирования различных задач / В. Д. Кильдишов – Москва : Солон-Пресс, 2015. – 156 с. – Режим доступа : <https://e.lanbook.com/book/64928> (дата обращения: 04.06.2021).
8. The 2016 edition of Review of Particle Physics should be cited as: C. Patrignani et al. (Particle Data Group), *Chinese Physics C*, 40, 100001 (2016).
9. Ивченко, Г. И. Введение в математическую статистику : учебник / Г. И. Ивченко, Ю. И. Медведев. – Москва : ЛКИ, 2010. – 247 с. – Текст : непосредственный.
10. Балдин, К. В. Теория вероятностей и математическая статистика : учебник / К. В. Балдин, В. Н. Башлыков. – Москва : Дашков и К°, 2016. – 472 с. – Текст : непосредственный.
11. Гареева, Г. А. Методы линейного программирования : учебно-методическое пособие / Г. А. Гареева. – Набережные Челны : Набережночелнинский институт Казанского фед. ун-та, 2019. – 59 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Shugaev O.V., Fomin E.V., Voskresenskaya T.P. *Patent RU 2801753 C2*, 15.08.2023.
2. Bykov B.V., Kulikov V.F. *Konstruktsiia mekhanicheskoi chasti vagonov: uchebnoe posobie* [The design of the mechanical part of the wagons: a textbook]. Moscow, Training and Methodological Center for Education in Railway Transport Publ., 2016, 247 p. (In Russian).
3. Rakov V.A. *Lokomotivy i motorvagonnyi podvizhnoi sostav* [Locomotives and motor-car rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1979, 213 p. (In Russian).
4. Kvashnina E.V., Druzhinina M.G. *Tiagovye raschety na pod"ezdnom puti promyshlennogo predpriatiia: metodicheskie ukazaniia* [Traction calculations on the access road of an industrial enterprise: guidelines]. Novokuznetsk, Siberian State Industrial University Publ., 2017, 54 p. (In Russian).
5. Ablyalimov O.S. The equation of train motion and some methods of its solution. *Universum: tekhnicheskie nauki – Universum: technical sciences*, 2020, no. 9 (78). Available at: <https://universum.com/ru/tech/archive/item/10715> (accessed: 04.06.2021).
6. Bakholdin V.I., Afonin G.S., Kurilkin D.N. *Osnovy lokomotivnoi tiagi: uchebnoe posobie* [Fundamentals of locomotive traction: a textbook]. Moscow, Training and Methodological Center for Education in Railway Transport Publ., 2014, 308 p. (In Russian).
7. Kildishov V.D. *Ispol'zovanie prilozheniia MS Excel dlia modelirovaniia razlichnykh zadach* [Using the MS Excel application for modeling various tasks]. Moscow, Solon-Press Publ., 2015, 156 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/64928> (accessed 04.06.2021) (In Russian).
8. The 2016 edition of Review of Particle Physics should be cited as: C. Patrignani et al. (Particle Data Group), *Chinese Physics C*, 40, 100001 (2016).
9. Ivchenko G.I., Medvedev Yu.I. *Vvedenie v matematicheskuiu statistiku: uchebnik* [Introduction to Mathematical Statistics: Textbook]. Moscow, LKI Publ., 2010, 247 p. (In Russian).
10. Baldin K.V., Bashlykov V.N. *Teoriia veroiatnostei i matematicheskaiia statistika: uchebnik* [Probability theory and mathematical statistics: textbook]. Moscow, Dashkov and K° Publ., 2016, 472 p. (In Russian).
11. Gareeva G.A. *Metody lineinogo programmirovaniia: uchebno-metodicheskoe posobie* [Methods of linear programming: educational and methodical manual]. Naberezhnye Chelny, Naberezhnye Chelny Institute of KFU Publ., 2019, 59 p. (In Russian).

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шугаев Олег Владимирович

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ).

Кирова ул., д. 42, г. Новокузнецк, 654007, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Транспорт и логистика», СибГИУ.

Тел.: +7 (950) 276-66-27.

E-mail: o_shugaev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Shugaev Oleg Vladimirovich

Siberian State Industrial University (SibGIU).

42, Kirova st., Novokuznetsk, 654007, the Russian Federation.

Senior teacher of the department «Transport and Logistics», SibGIU.

Phone: +7 (950) 276-66-27.

E-mail: o_shugaev@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТАТЬИ

Шугаев, О. В. Определение закономерности распределения отклонений величины установленного темпа движения поездов на участке пути с автоматической системой интервального регулирования при воздействии окружающей среды и характера ведения поезда / О. В. Шугаев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 3 (55). – С. 54 – 66.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Shugaev O.V. Determination of the regularity of the distribution of deviations in the value of the set train speed on a section of track with an automatic interval control system when exposed to the environment and the nature of the train. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 3 (55), pp. 54-66 (In Russian).

УДК 625.11:332.133.22

Н. А. Медведева, В. С. Шварцфельд

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

ФОРМИРОВАНИЕ И ОТБОР ВАРИАНТОВ ТОПОЛОГИИ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ В МАЛООСВОЕННЫХ РЕГИОНАХ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы, связанные с формированием сети железных дорог в малоосвоенных регионах. Как правило, к таким регионам относятся регионы с большой территорией, малочисленным населением, слабым развитием или полным отсутствием железнодорожной сети путей сообщения, богатейшими запасами месторождений природных ресурсов. Как правило, данные регионы из-за слабо развитой добывающей и перерабатывающей промышленности являются депрессивными с точки зрения устойчивого развития и роста валового регионального продукта. В малоосвоенных регионах (Арктическая зона, Сибирь, Прибайкалье и Дальний Восток), имеющих огромный потенциал социально-экономического развития, особое внимание должно уделяться освоению природно-ресурсного потенциала и созданию новых предприятий, которые напрямую зависят от транспортной доступности. Поэтому перспективному планированию освоения месторождений природных ресурсов и развитию региона должно предшествовать рассмотрение вопросов, связанных с проектированием и созданием сети железных дорог. Формирование и отбор вариантов создания начертания (топологии) сети железных дорог являются в настоящее время все еще актуальными вопросами, требующими дальнейшего совершенствования. В данной работе для отбора допустимого множества вариантов и окончательного принятия решения о конфигурации сети железных дорог в малоосвоенных регионах предлагается использовать многокритериальный подход. Частными критериями приняты такие показатели, как суммарная расчетная длина, количество малых водопропускных сооружений, суммарная площадь, занимаемая средними и большими мостами, протяженность тоннелей и эстакад, масса грузового поезда, провозная способность. Приведены постановка задачи и пути ее дальнейшего решения.

Ключевые слова: малоосвоенный район, железнодорожная сеть, топология сети железных дорог, многокритериальная оценка вариантов, формирование множества вариантов.

Natalia A. Medvedeva, Viacheslav S. Shvartcfeld

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), Saint Petersburg, the Russian Federation

FORMATION AND SELECTION OF RAILWAY NETWORK TOPOLOGY OPTIONS IN UNDERGROWNED REGIONS

Abstract. The article deals with issues related to the formation of a network of railways in underdeveloped regions. As a rule, such regions include regions with a large territory, sparse population, poor development or complete absence

of a railway network of communications, and the richest reserves of natural resource deposits. As a rule, these regions, due to the underdeveloped mining and processing industries, are depressive in terms of sustainable development and growth of the gross regional product. In underdeveloped regions (the Arctic zone, Siberia, the Baikal region and the Far East), which have a huge potential for socio-economic development, special attention should be paid to the development of natural resource potential and the creation of new enterprises, which directly depends on transport accessibility. Therefore, long-term planning for the development of deposits of natural resources and the development of the region should be preceded by consideration of issues related to the design and creation of a railway network. The formation and selection of options for creating the outline (topology) of the railway network is currently still an urgent issue that requires further improvement. In this paper, to select a feasible set of options and make a final decision on the configuration of the railway network in underdeveloped regions, it is proposed to use a multi-criteria approach. Particular criteria are such indicators as the total estimated length, the number of small culverts, the total area occupied by medium and large bridges, the length of tunnels and flyovers, the mass of a freight train, carrying capacity. The statement of the problem and ways of its further solution are given.

Keywords: underdeveloped area, railway network, topology of the railway network, multi-criteria evaluation of options, formation of multiple options.

Строительство постоянно действующих путей сообщения, в том числе и железнодорожных линий, в пределах малоосвоенного (слаборазвитого) региона играет важную роль для создания новых производственных мощностей и является важнейшим стимулом развития экономики.

Изучение вопросов, связанных с развитием транспорта в малоосвоенных районах, является важным направлением исследования транспортной системы страны. Большое теоретическое и практическое значение имеет учет региональной специфики, оказывающей влияние на технические и экономические показатели работы существующего транспорта или на вновь создаваемую сеть транспортных коммуникаций. Особое внимание заслуживает изучение вопросов формирования топологии транспортной сети, в том числе и железнодорожной, в районах нового освоения месторождений (Сибирь, Дальний Восток, Арктическая зона). Вопросам создания железнодорожной сети в таких районах посвящены работы [1 – 3].

Строительство новой транспортной сети необходимо не только для освоения природных ресурсов, но и для улучшения обеспечения доступности и качества транспортных услуг для населения в соответствии с современными социальными стандартами, создания условий для экономической активности на малоосвоенных территориях, появления новых предприятий и новых рабочих мест, увеличения регионального валового продукта, повышения уровня безопасности страны и т. п.

Формирование вариантов топологии сети железных дорог в малоосвоенных регионах. В данной работе будем считать, что для формирования вариантов топологии сети железных дорог малоосвоенного региона известен сценарий его социально-экономического развития [4], в соответствии с которым определен перечень новых объектов освоения природных ресурсов и их мощность, существующих или новых предприятий и населенных пунктов, которые получают свое дальнейшее развитие. Назовем их опорными пунктами транспортной (железнодорожной) сети. Опорные пункты посредством железнодорожных линий должны быть связаны с существующей сетью железных дорог.

Сложность решения рассматриваемой задачи заключается в ее многовариантности. Если принять, что в соответствии с утвержденным на перспективу сценарием социально-экономического развития территории региона имеются намеченные к реализации опорные пункты, к которым должны быть построены железнодорожные линии, то в зависимости от месторасположения опорных пунктов и станций (станции) примыкания к существующей сети железных дорог можно сформировать варианты топологии путей сообщения.

На рисунке 1 иллюстрируются варианты топологии сети железных дорог при трех опорных пунктах (1, 2 и 3) и одной станции примыкания (А) к существующей сети железных дорог.

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

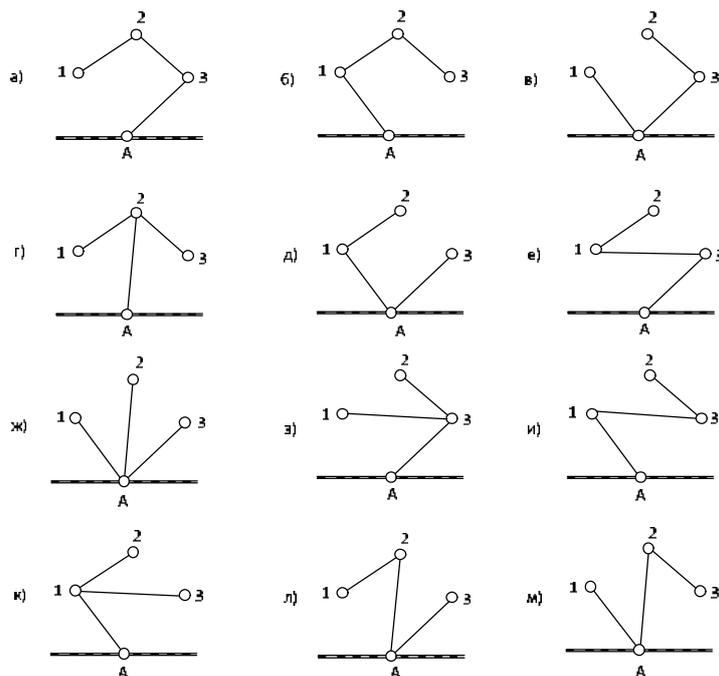


Рисунок 1 – Варианты топологии сети железных дорог малоосвоенного региона с одной станцией примыкания к существующей сети

Вариантов топологии может быть больше, если рассмотреть дополнительно станцию примыкания (В) на вновь создаваемой сети железнодорожных дорог в малоосвоенном регионе (рисунок 2).

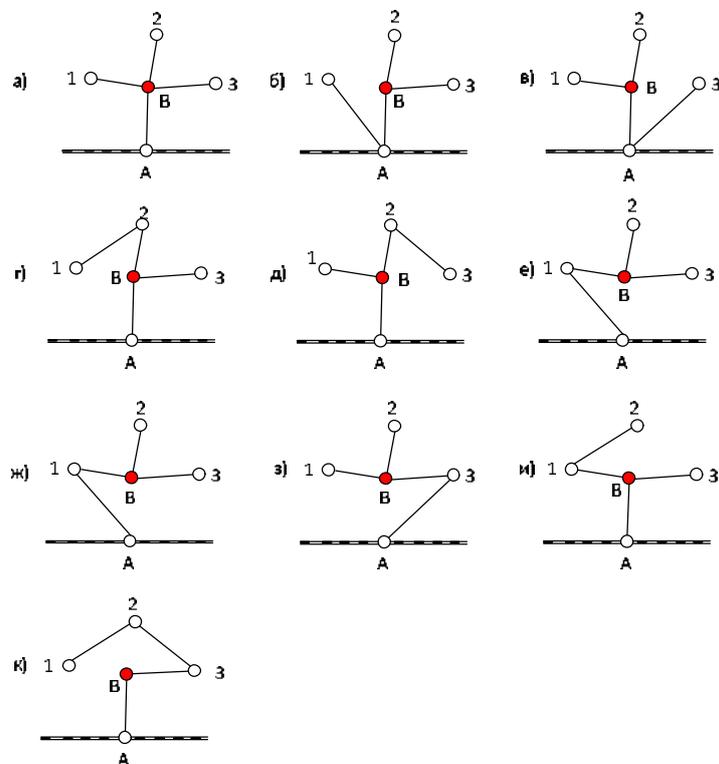


Рисунок 2 – Варианты топологии сети железных дорог малоосвоенного региона с одной станцией примыкания к новой железнодорожной сети

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

При проектировании двух станций примыкания (А и С) к существующей сети железных дорог дополнительные варианты иллюстрируются на рисунке 3.

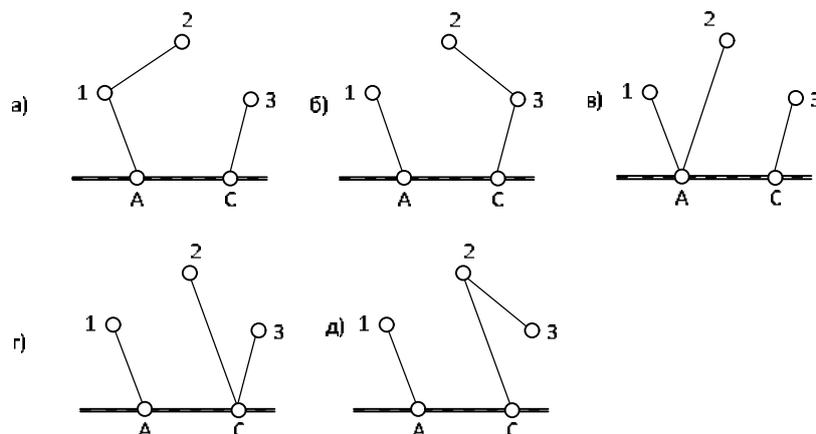


Рисунок 3 – Варианты топологии сети железных дорог малоосвоенного региона с двумя станциями примыкания к существующей сети железных дорог

Из приведенного выше примера видно, что даже при незначительном количестве опорных пунктов железнодорожной сети вариантов топологии сети железных дорог в малоосвоенном регионе может быть довольно много. Следует также отметить, что решение рассматриваемой задачи еще больше усложняется из-за необходимости поиска наилучшей альтернативы направления трассы железнодорожной линии между опорными пунктами для каждого варианта топологии сети.

Методы и критерии, используемые для формирования и отбора вариантов топологии сети железных дорог в малоосвоенном регионе. Опираясь на теорию выбора и принятия решений [5], можно предложить следующую процедуру формирования и отбора вариантов топологии сети железных дорог, которая состоит из трех этапов:

первый этап – формирование исходного множества вариантов (ИМВ);

второй этап – сужение исходного множества, т. е. проведение процедуры по уменьшению вариантов топологии сети железных дорог в малоосвоенном регионе по соответствующему критерию (критериям);

третий этап – окончательный выбор наилучшего и близких к нему вариантов для принятия окончательного решения.

Наиболее трудоемкими являются первый и второй этапы.

На первом этапе формируется универсальное множество всех возможных вариантов (УМВ), основанное на простом переборе всех возможных конфигураций сети железных дорог в малоосвоенном регионе. Варианты, входящие в универсальное множество, могут иметь очень большой разброс в значениях показателей, по которым производят дальнейшее сравнение вариантов, и, естественно, они не могут быть решениями рассматриваемой задачи.

На втором этапе универсальное множество вариантов сужается с помощью принципа «оптимальности». Множество, полученное на втором этапе, является исходным множеством вариантов, которое и подлежит дальнейшему рассмотрению.

Принцип «оптимальности» заключается в использовании информации о свойствах задачи в виде параметров, определяющих геометрические, функциональные, временные, физические, структурные и другие свойства железнодорожных линий и их отдельных элементов [6].

Так, например, к геометрическим параметрам можно отнести руководящий уклон (‰), длину железнодорожной линии (км), полезную длину приемоотправочных путей (м) на отдельных пунктах, количество водопропускных сооружений (шт.) и т. п.

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

К функциональным параметрам, которые характеризуют эффективность работы железнодорожной линии, относятся пропускная (пар поездов/сут) и провозная (млн т/год) способности.

Временные параметры характеризуют продолжительность процесса – интервалы движения поездов; перегонное время хода поездов (мин); межстанционные интервалы (мин) на прием и отправление.

Физические параметры связаны с физическими свойствами элементов железнодорожной линии – сила тяги (кГс) и масса локомотива (т); масса поезда (т); скорость поезда (км/ч); масса вагона (т); нагрузка на ось (т/ось) и т. п.

Структурные параметры характеризуют количественное и взаимное расположение отдельных элементов, например, количество вагонов (шт.) в поезде; схема расположения приемоотправочных путей на отдельных пунктах (поперечное, полупродольное, продольное).

Для каждого варианта сети железных дорог исходного множества большинство из перечисленных параметров должны использоваться как аддитивные.

В данном исследовании приняты следующие параметры (показатели) d_p для формирования множества вариантов топологии сети в малоосвоенном регионе:

- 1) суммарная расчетная длина железнодорожных линий (км), $p = 1$;
- 2) количество малых водопропускных сооружений (шт.), $p = 2$;
- 3) суммарная площадь (кв. м), занимаемая средними и большими мостами (зависит от длины и средней высоты моста), $p = 3$;
- 4) протяженность тоннелей и эстакад (км), $p = 4$;
- 5) масса грузового поезда (т), $p = 5$;
- 6) провозная способность (млн т/год), $p = 6$.

Отбор вариантов для дальнейшего обоснования топологии сети железных дорог малоосвоенного региона предлагается осуществлять с помощью многокритериального подхода.

За критерий отбора в данной работе принимается обобщенный нормализованный критерий F_j , определяемый как сумма нормализованных частных показателей с учетом коэффициента важности (полезности) λ_j каждого из них.

Для дальнейшего изложения введем следующие обозначения:

J – количество вариантов топологий сети железных дорог, формируемых в малоосвоенном регионе;

p – параметр (показатель), характеризующий вариант топологии сети железных дорог, $p = \overline{1, P}$; $P = 6$ – общее число показателей;

d_{jp} – соответствующий p показатель j -го варианта топологии сети железных дорог.

Нормализованные значения при минимизации частных показателей определяются по формуле:

$$r_{jp} = \frac{d_{jp} - d_p^{\min}}{d_p^{\max} - d_p^{\min}}, \quad (1)$$

где d_{jp} – показатель соответствующего варианта топологии сети железных дорог; d_p^{\min} , d_p^{\max} – минимальное и максимальное значения соответствующего показателя из рассматриваемых вариантов топологии. Минимизации подлежат показатели 1 – 4.

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Нормализованные значения при максимизации частных показателей определяются по формуле:

$$r_{jp} = \frac{d_p^{\max} - d_{ip}}{d_p^{\max} - d_p^{\min}}. \quad (2)$$

Максимизации подлежат показатели 5 и 6 (масса грузовых поездов и провозная способность).

Ввиду того, что рассматриваемые показатели имеют неодинаковую важность при решении данной задачи, необходимо использовать коэффициенты важности λ_p , значения которых принимают на основе проведения экспертной оценки. Значения λ_p должны находиться в диапазоне $[0, 1]$. При этом обязательно соблюдение требования: $\sum_{p=1}^P \lambda_p = 1$.

Учитывая изложенное, обоснование варианта топологии сети железных дорог малоосвоенного региона осуществляется на основе формирования допустимого множества ее вариантов и отбора конкурентных вариантов для окончательного принятия решений.

Постановка рассматриваемой в данной статье задачи формулируется следующим образом.

Для малоосвоенного региона в соответствии с заданным сценарием его социально-экономического развития заданы опорные пункты (новые месторождения, перерабатывающие предприятия, населенные пункты), к которым должны быть построены железнодорожные линии. Для каждого опорного пункта известны их производственные показатели и год строительства. На основе экономических изысканий, предварительного анализа природных и экономических факторов (рельефа, гидрологии, геологии местности и др.) намечаются возможные пути строительства железнодорожных линий для обеспечения связи опорных пунктов между собой и существующей сетью путей сообщения, т. е. формируется универсальное и исходное множество вариантов топологии сети железных дорог малоосвоенного региона.

Требуется найти такой вариант сети железных дорог, который позволит обеспечить транспортно-экономические связи пунктов зарождения и погашения грузопотоков, освоить объемы перспективных перевозок с минимальным интегральным нормализованным критерием.

В такой постановке предполагается, что в результате решения поставленной задачи будут найдены как вариант с минимальным интегральным нормализованным критерием $\min F_j$, так и несколько альтернативных вариантов топологии, имеющих близкие к нему значения критерия.

Интегральный нормализованный критерий для соответствующего варианта определяется по формуле:

$$F_j = \sum_{p=1}^P r_{jp} \cdot \lambda_p. \quad (3)$$

Целью дальнейшего рассмотрения наилучшего варианта и нескольких вариантов, близких к нему, является обоснование окончательного варианта топологии сети железных дорог с учетом определения стоимостных показателей и внутранспортного эффекта, который позволит выявить влияние создаваемой сети железных дорог на уровень развития региона, на изменение валового регионального продукта, а также учесть ущерб от истощения природных ресурсов, загрязнения окружающей среды и т. п. [7].

Список литературы

1. Кирпичников, К. А. Новые железные дороги Дальневосточного региона для освоения природно-ресурсного потенциала страны / К. А. Кирпичников. – Текст : непосредственный //

Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации российских железных дорог, Иркутск, 10 – 11 октября 2007 г. – Иркутск : Иркутский государственный университет путей сообщения, 2007. – С. 78–81.

2. Северные и восточные районы России – важнейший полигон расширения сети железных дорог страны в XXI веке / В. А. Копыленко, Ю. А. Быков, В. М. Круглов [и др.]. – Текст : непосредственный // Транспортное строительство. – 2008. – № 4. – С. 2–4.

3. Ревва, П. С. Обоснование развития сети железных дорог в малоосвоенных регионах / П. С. Ревва, В. С. Шварцфельд. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 1 (33). – С. 211–214.

4. Шварцфельд, В. С. Теория и практика проектирования развития региональной сети железных дорог на основе геоинформационных технологий : специальность 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Шварцфельд Вячеслав Семенович. – Хабаровск, 2001. – 400 с. – Текст : непосредственный.

5. Осипова, В. А. Математические методы поддержки принятия решений / В. А. Осипова, Н. С. Алексеев. – Москва : Инфра-М, 2019. – 134 с. – Текст : непосредственный.

6. Гавриленков, А. В. Формирование множества вариантов железной дороги и их сравнение на этапе аванпроектирования / А. В. Гавриленков, Е. А. Макушкина, Е. А. Шиварева. – Москва : МИИТ, 1991. – 39 с. – Текст : непосредственный.

7. Шварцфельд, В. С. Модель развития сети железных дорог в малоосвоенных районах / В. С. Шварцфельд, Н. А. Медведева. – Текст : электронный // IV Бетанкуровский международный инженерный форум : электронный сборник трудов. Санкт-Петербург, 30 ноября – 2 декабря 2022 г. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2022. – С. 402–404. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50201621> (дата обращения: 13.07.2023).

References

1. Kirpichnikov K.A. New railways of the Far East region for the development of the natural resource potential of the country. *Problemy i perspektivy izyskaniy, proyektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii rossiyskikh zheleznykh dorog* [Problems and prospects of research, design, construction and operation of Russian railways]. Irkutsk, 2007, pp. 78-81 (In Russian).

2. Kopylenko V.A., Bykov Yu.A., Kruglov V.M. et al. Northern and Eastern regions of Russia – the most important polygon for expanding the country's railway network in the 21st century. *Transportnoye stroitel'stvo – Transport construction*, 2008, no. 4, pp. 2-4 (In Russian).

3. Revva P.S., Shvartfeld V.S. Rationale for the development of the railway network in underdeveloped regions. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2012, no. 1 (33), pp. 211-214 (In Russian).

4. Shvartfeld V.S. *Teorija i praktika proektirovaniya razvitija regional'noj seti zheleznyh dorog na osnove geoinformacionnyh tehnologij* (Theory and practice of designing the development of a regional railway network based on geoinformation technologies). *Doctor of Sciences in Engineering thesis*, Khabarovsk, 2001, 400 p. (In Russian).

5. Osipova V.A., Alekseev N.S. *Matematicheskie metody podderzhki priniatiia reshenii* [Mathematical methods of decision support]. Moscow, INFRA-M Publ., 2019, 134 p. (In Russian).

6. Gavrilencov A.V., Makushkina E.A., Shivareva E.A. *Formirovaniye mnozhestva variantov zheleznoy dorogi i ikh sravneniye na etape avanproyektirovaniya* [Formation of a set of railway options and their comparison at the stage of preliminary design]. Moscow, MIIT Publ., 1991, 39 p. (In Russian).

7. Shvartfeld V.S., Medvedeva N.A. A model for the development of a railway network in underdeveloped areas. *IV Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum : elektronnyy sbornik trudov* [IV Betancur International Engineering Forum: electronic collection of papers]. Saint Petersburg, 2022, pp. 402-404. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50201621> (accessed 13.07.2023) (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Медведева Наталия Алексеевна

Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).

Московский проспект, д. 9, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог», ПГУПС.

Тел.: +7 (931) 970-89-04.

E-mail: natali171297@mail.ru

Шварцфельд Вячеслав Семенович

Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).

Московский проспект, д. 9, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Изыскания и проектирование железных
дорог», ПГУПС.

Тел.: +7 (914) 541-53-20.

E-mail: v_s_s_@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Медведева, Н. А. Формирование и отбор вариантов топологии сети железных дорог в малоосвоенных регионах / Н. А. Медведева, В. С. Шварцфельд. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 3 (55). – С. 66 – 73.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Medvedeva Natalia Alekseevna

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport
University (PGUPS).

9, Moskovsky av., St. Petersburg, the Russian
Federation.

Postgraduate student of the department «Research
and Design of Railways», PGUPS.

Phone: +7 (931) 970-89-04.

E-mail: natali171297@mail.ru

Shvartcfeild Vyacheslav Semenovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport
University (PGUPS).

9, Moskovsky av., St. Petersburg, the Russian
Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor,
professor of the department «Research and Design of
Railways», PGUPS.

Phone: +7 (914) 541-53-20.

E-mail: v_s_s_@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Medvedeva N.A., Shvartcfeild V.S. Formation and selection of railway network topology options in undergrowned regions. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 3 (55), pp. 66-73 (In Russian).

УДК 656.225.04

З. В. Эргашева, Ж. С. Баротов, Ф. К. Самиев

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ КОНТЕЙНЕРОВ
В СОСТАВЕ БЛОК-ТРЕЙНА ПО ОТПРАВЛЕНИЮ НА СТАНЦИИ
ПРИМЫКАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТЕРМИНАЛА**

Аннотация. Цель работы – сокращение времени на обработку состава контейнерного блок-трейна при нормировании основных технологических операций по отправлению на станции примыкания железнодорожного терминала. В статье рассмотрен технологический процесс обработки контейнеров в составе блок-трейна по отправлению со станции примыкания к железнодорожному терминалу на основе математическо-статистического метода. Результаты анализа технологической обработки по отправлению контейнерного блок-трейна на станциях примыкания к железнодорожному терминалу были определены методами математической статистики. Доказана корректность аппроксимации по закону нормального распределения по критерию В. И. Романовского при отправлении контейнеров в составе блок-трейна со станции. Предлагаемая технология основана на иллюстративных данных контейнерного блок-трейна путем определения хи-квадрата, что доказывает аппроксимация сокращения времени на технологические операции по отправлению по нормальному закону распределения и не противоречит этому наблюдению. Также выполнен критерий согласия Пирсона (значения критерия согласия были менее трех во всех исследованных случаях). По рассматриваемым технологиям обработки поездов на станции примыкания можно прийти к выводу о том, что время на технологические операции по отправлению грузового поезда составляет 154 мин, а контейнерного блок-трейна – 132 мин. Сокращение времени на технологическую обработку по отправлению контейнерного блок-трейна на станциях примыкания к железнодорожному терминалу будет происходить за счет выполнения основных технологических задач и накопления контейнерных поездов на железнодорожных терминалах, что

в свою очередь даст возможность грузоотправителям надежной, ускоренной доставки широкой номенклатуры контейнеропригодных товаров.

Ключевые слова: контейнер, груз, станция, подвижной состав, обработка грузового поезда, блок-трейн.

Zakhro V. Ergasheva, Jamshit S. Barotov, Farruxjon K. Samiyev

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, Republic of Uzbekistan

IMPROVING THE CONTAINER HANDLING TECHNOLOGY AS PART OF THE BLOCK TRAIN FOR DEPARTURE AT THE JUNCTION STATION OF THE RAILWAY TERMINAL

Abstract. The purpose of the work is to reduce the time for processing the composition of the container block train when rationing the main technological operations for departure at the station of the railway terminal. The article describes the technological process of processing containers as part of a block train for departure from the station adjacent to the railway terminal based on the mathematical and statistical method. The results of the analysis of the technological processing for the dispatch of the container block train at the stations adjacent to the railway terminal were determined by the methods of mathematical statistics. The correctness of the approximation according to the law of normal distribution according to the criterion of V. I. Romanovsky when shipping containers as part of a block train from the station is proved. The proposed technology is based on illustrative data of the container block train by determining the chi-square, which proves the approximation of the reduction of time for technological operations for departure according to the normal distribution law and does not contradict this observation. Pearson's consent criterion was also fulfilled (the values of the consent criterion were less than three in all the studied cases). According to the considered technologies for processing trains at the junction station, it can be concluded that the time for technological operations for the departure of a freight train is 154 minutes, and a container block train is 132 minutes. The reduction of processing time for the dispatch of a container block train at the stations adjacent to the railway terminal will occur due to the fulfillment of basic technological tasks and the accumulation of container trains at railway terminals, which in turn will enable shippers to reliably, accelerated delivery of a wide range of container-usable goods.

Keywords: container, cargo, station, rolling stock, freight train handling, block train.

Движение железнодорожного состава осуществляется по строгому расписанию.

В зависимости от условий договора железнодорожной перевозки отправляемые грузы перевозят в местном или прямом сообщении.

В случае перевозки в местном сообщении поезд доставляет груз в рамках одной железной дороги. В случае прямого сообщения для доставки груза используется две или более железные дороги, составляющие единую железнодорожную сеть [1, 2].

Грузы перевозят в вагонах, контейнерах, которые принадлежат организации железнодорожного транспорта, и в вагонах, которые являются собственностью или арендуются юридическими либо физическими лицами.

Грузополучатель должен быть уведомлен о прибывшем на его адрес грузе не позже чем в полдень на следующий день после прибытия груза. Грузополучатель должен окончательно рассчитаться с перевозчиком за транспортные услуги.

Система работы железнодорожной станции включает в себя порядок и последовательность обработки поездов и вагонов. При этом должно обеспечиваться наиболее оптимальное использование технических средств с учетом современных технологий и штатных сотрудников станции. К штатным работникам относятся составители, осмотрщики, приемосдатчики.

Для составления системы работы железнодорожной станции должны быть прописаны:

- 1) набор технических операций;
- 2) хронологическая последовательность операций;
- 3) сроки выполнения каждой операции;
- 4) средства, необходимые для выполнения каждой операции;
- 5) работники, отвечающие за выполнение каждой операции [3, 4].

Эффективность работы железнодорожного транспорта зависит от четкой организации движения поездов, которая должна обеспечить требуемый для строительства грузооборот,

наилучшее использование технических средств и безопасность движения поездов. Продолжительность цикла операций по загрузке составов, доставке грузов, разгрузке у места назначения и возвращению порожних вагонов к месту погрузки должна быть минимальной, при этом грузы должны перемещаться бесперебойно в соответствии с графиком [5, 6].

Функционирование любой транспортной системы, в том числе железнодорожного локомотива, можно представить как хронологическую последовательность событий. Моделирование подобной системы относится к дискретному, т. е. предполагающему перерывы в работе железнодорожного состава и железнодорожной станции.

Выделим операции, которые осуществляются в парке отправления:

- 1) операции прицепки и отцепки железнодорожного локомотива;
- 2) проведение технического и коммерческого осмотра;
- 3) осуществление безотцепного ремонта;
- 4) в случае обнаружения неисправностей – их устранение;
- 5) подготовка документации и их передача поездной бригаде;
- 6) апробирование работы автоматических тормозов;
- 7) осуществление операций по отправке.

По технологическому процессу работы станции время на обработку грузового поезда со сменой локомотива можно рассмотреть по таблице 1.

Необходимость соблюдения единого общесетевого графика движения поездов требует слаженного взаимодействия всех подразделений железных дорог. Движение поездов строго по графику обеспечивается правильной организацией и точным выполнением технологического процесса работы станций, депо, тяговых подстанций, пунктов технического обслуживания и других подразделений, связанных с движением поездов [8 – 10].

Таможенные операции и грузовые операции с контейнерным блок-трейном будут производиться на железнодорожном терминале, также на железнодорожном терминале работниками пункта технического осмотра и пункта коммерческого осмотра производятся технические и коммерческие осмотры, работником станции выполняются проверка правильности размещения контейнеров на фитинговых платформах и прием груза к отправлению. В общей сложности на все производимые операции затрачивается около 400 мин [3, 12].

Таблица 1 – Обработка грузового поезда со сменой локомотива

№ п/п	Задача	Время на выполнение, мин
1	Извещение работников железнодорожного парка о номере, пути приема и времени прибытия железнодорожного состава	1
2	Выход на путь приема работников, участвующих в обработке поезда для его встречи «с ходу»	1
3	Закрепление состава поезда, принятие от машиниста перевозочных документов	9
4	Отцепка поездного локомотива и выезд его с пути приема	5
5	Заезд локомотива на путь и прицепка локомотива к составу	5
6	Ограждение железнодорожного состава с помощью ручных переносных сигналов	17
7	Зарядка тормозной магистрали поезда	15
8	Полное апробирование тормозов железнодорожного состава, при необходимости проведение дополнительных работ по устранению неисправностей. Навешивание хвостовых сигналов, доклад о готовности	40
9	Прием под охрану вагонов состава с опасными и номенклатурными грузами	30
10	Снятие ограждения	17
11	Уборка средств закрепления состава	9
12	Вручение локомотивной бригаде перевозочной документации, отправление железнодорожного состава	5
Общая продолжительность операций, мин		154

Не позднее чем за один час до прибытия поездного локомотива контейнерный блок-трейн будет выставляться на пути станции отправления. Затем поездной локомотив сцепляется с составом, проверяются тормоза и контейнерный блок-трейн отправляется со станции по твердому графику.

Технологическое время обработки состава контейнерного блок-трейна по отправлению со станции примыкания железнодорожного терминала указано в таблице 2.

Таблица 2 – Технологическое время обработки по отправлению состава контейнерного поезда со станции примыкания железнодорожного терминала

№ п/п	Наименование операции	Время, мин
1	Извещение работников СТЦ, ПТО ВЧДЭ-13, ФГП ВО, ДСПП 1 парка о номере, времени прибытия, пути приема поезда	0
2	Выход на путь приема работников, участвующих в обработке поезда для встречи «с ходу»	0
3	Закрепление состава, прием от машиниста пакета перевозочных документов	8
4	Отцепка поездного локомотива и выезд его с пути приема	4
5	Заезд локомотива на путь и прицепка локомотива к составу	4
6	Ограждение состава ручными переносными сигналами	15
7	Зарядка тормозной магистрали поезда	13
8	Полное опробование тормозов состава от локомотива, дополнительные работы по устранению неисправностей, навешивание хвостовых сигналов, доклад о готовности	30
9	Прием под охрану вагонов с номенклатурными и опасными грузами	30
10	Снятие ограждения	15
11	Уборка средств закрепления состава	8
12	Вручение локомотивной бригаде пакета перевозочных документов, предупреждения, отправление	5
Общая продолжительность, мин		132

Общность и сумма объектов или явлений одного типа, объединенных каким-либо общим признаком, составляют генеральную совокупность. Например, нас интересует соблюдение сроков обработки поезда на станциях отправления, т. е. все поезда, обрабатываемые на станциях, составляют генеральную совокупность. Целью наблюдений является изучение интересующих нас свойств объектов генерального комплекса. При наличии возможности исследовать все соответствующие объекты генерального комплекса эта задача была бы решена довольно легко. Часто такие исследования при большом объеме или количестве единиц требуют серьезных трудовых или материальных затрат.

В подобных случаях в целях наблюдения из генерального комплекса с применением метода статистического отбора и путем случайной выборки отбирается конечное количество объектов, которое затем исследуется.

Комплекс случайным образом отобранных объектов для наблюдения называется отобранным комплексом или выборкой. Найденные значения характеристик отобранного комплекса позволяют судить о значениях характеристик всего генерального комплекса.

Для того чтобы обеспечить при осуществлении наблюдений надежность этих выводов, должны быть выполнены следующие условия:

- 1) выборка должна содержать достаточное количество объектов наблюдения;
- 2) объекты наблюдения должны отображать генеральный комплекс, а именно иметь общие с данным комплексом характеристики.

С увеличением числа наблюдений (объема выборки) характеристики количества отобранного комплекса (среднее значение признака, его дисперсия и т. д.) приближаются к характеристикам генерального комплекса.

Обработав статистические данные по отправляемым поездам, путем их анализа, количество наблюдений в выборке n можно определить по формуле:

$$n \geq \frac{X^2}{4 \cdot \mu^2}, \quad (1)$$

где X – величина, полученная из таблицы значений интеграла в зависимости от полученной достоверности $P = F(x)$ или от степени достоверности полученных результатов интеграла вероятностей;

μ – необходимая точность при этом виде исследований, $\mu = 0,05$.

В практике научных исследований часто принимают $P = 0,90$ [2, 3]. Для случая, когда принятая достоверность наблюдений $P = 0,90$, а степень точности в исследовании $\mu = 0,05$, в соответствии с работой [3] находим $X = 1,65$. В этом случае

$$n \geq \frac{1,65^2}{4 \cdot 0,05^2} = 273.$$

Исходя из этого объем выборки (общее количество наблюдений) должен состоять не менее чем из 273 объектов. Для того чтобы выборка достоверно отражала свойства генерального комплекса, каждую единицу наблюдения необходимо брать приблизительно, без какого-либо подбора, совершенно случайно.

Если объекты генерального комплекса являются двигающимися и при этом обеспечен их случайный отбор, то в выборку можно ввести любую последовательность (согласованность), состоящую из n объектов. Например, поскольку время, затраченное на прибытие какого-либо груза в вагонном отправлении, является событием (значением) случайным, для определения среднего времени доставки может быть отобрана выборка, состоящая из n вагонов, отправленных подряд.

При помощи математико-статистических методов [7, 11] исходя из количества объектов (n) генерального комплекса определяется величина разряда:

$$C = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{K}, \quad (2)$$

где K – число разрядов;

t_{\max} , t_{\min} – соответственно наибольшее и наименьшее значения времени между наблюдениями. В нашем случае это соответственно максимальное и минимальное время, затраченное на обработку поезда, – часы.

Выполнение обработки поезда по отправлению рассмотрим на примере станции отправления с обработкой технологического процесса на основе математико-статистического метода. Согласно уравнению (1) количество наблюдаемых отправлений должно составить не менее 273 шт.

В настоящей работе были обработаны статистические сведения по 300 объектам. Это, в свою очередь, показывает, что выбранных данных достаточно.

Определим число разрядов по уравнению:

$$K = (1 + 3,322 \cdot \ln(n)) = 9,27. \quad (3)$$

Максимальное и минимальное время, затраченное на доставку вагона между наблюдениями, составило 220 и 82 мин соответственно. Таким образом, на основе выражения (2) может быть определена величина разряда:

$$C = \frac{220 - 82}{9,27} \approx 15.$$

Определим границы (пределы) разряда доставки. Весь процесс исследования при помощи статистико-математических методов будет выполнен на основе данных таблицы 3. При этом малое граничное значение первого разряда определится на основе данных таблицы 1.

Таблица 3 – Результаты исследования обработки поезда по отправлению на станциях примыкания к железнодорожному терминалу на основании нормального закона распределения

№ п/п	Величина разряда h_i		Среднее значение в разряде $t_{cp(i)}$	Количество наблюдений в ряде n_i	Статистическая частота $p_{c(i)}$
1	2		3	4	5
1	74,5	89,5	82	8	0,03
2	89,5	104,5	97	18	0,06
3	104,5	119,5	112	35	0,116
4	119,5	134,5	127	58	0,19
5	134,5	149,5	142	62	0,206
6	149,5	164,5	157	53	0,176
7	164,5	179,5	172	33	0,12
8	179,5	194,5	187	21	0,07
9	194,5	209,5	202	10	0,022
10	209,5	224,5	217	2	0,01
Итого	---	----	---	300	1,0

Окончание таблицы 3

№ п/п	$t_{cp(i)} \cdot p_{c(i)}$	$T_{cp(i)}^2 \cdot p_{c(i)}$	Вероятность в разряде $p_{n(i)}$	Количество теоретических наблюдений в разрядах f_i	$\frac{(n_i - f_i)^2}{f_i}$
1	6	7	8	9	10
1	2,186	179,306	0,0219	6,57	2,0449
2	5,82	564,54	0,0579	17,37	0,3969
3	13,06	1463,46	0,1168	35,04	0,0016
4	24,553	3118,273	0,179	53,7	18,49
5	29,346	4167,226	0,2086	62,58	0,3364
6	27,736	4354,656	0,1849	55,47	6,1009
7	18,92	3254,24	0,1247	37,41	19,4481
8	13,09	2447,83	0,064	19,2	3,24
9	6,733	1360,13	0,0249	7,47	6,4009
10	1,446	313,926	0,0074	2,22	0,0484
Итого	142,9	21223,6	1,0000	297,03	---

Вычислим большое граничное значение первого разряда:

$$h_{\min} = t_{\min} - \frac{C}{2} = 82 - \frac{15}{2} = 74,5.$$

Таким образом, границы первого разряда находятся в интервале $74,5 \div 89,5$:

$$h_{\min} = 74,5 + C = 74,5 + 15 = 89,5.$$

Соответственно границы второго разряда находятся в диапазоне $56,5 \div 69,5$, а третьего – в диапазоне $69,5 \div 82,5$ и т. д.

Средний объем доставки (см. таблицу 1, столбец 3) определяется так:

$$h_{cp(i)} = t_{\min(i)} + \frac{t_{\max(i)}}{2}. \quad (4)$$

Согласно уравнению (4) среднее значение в первом разряде равно 50, во втором разряде 60 и т. д.

Количество статистических наблюдений в разряде доставки (таблица 3, графа 4), т. е. долю выполнения обработки состава, приходящуюся на каждый разряд, можно определить с помощью функции учета «СЧЕТЕСЛИ» программы Microsoft Excel.

Статистическая частота доставки (см. таблицу 3, графу 5) определяется так:

$$P_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^j n_i}. \quad (5)$$

Например, статистическая частота обработки состава в первом разряде равна $8/300 = 0,026$ и т. д.

Среднее значение, характеризующее состояние ряда статистического распределения, т. е. в исследуемом случае среднестатистическое значение выполнения сроков доставки, определяется следующим образом:

$$t_{cp} = \sum_{i=1}^j t_{cp(i)} \cdot P_{c(i)}, \quad (6)$$

где i – разрядное число ($i = 1, 2, \dots, j$).

Следовательно, среднестатистическое значение времени выполнения отправления контейнерного блок-трейна на основе уравнения (6) равно 143 мин (см. таблицу 3, графу 6).

Статистическая дисперсия, описывающая разброс ряда распределения, т. е. статистическая дисперсия выполнения обработки состава в исследуемом случае, определяется так:

$$D_t = \sum_{i=1}^j t_{cp(i)}^2 P_{c(i)} - t_{cp}^2. \quad (7)$$

Следовательно, статистическая дисперсия выполнения обработки состава согласно формуле (7) равна 803,19.

Среднестатистическое квадратичное отклонение, описывающее абсолютное отклонение статистического ряда, т. е. в исследуемом случае среднестатистическое квадратичное отклонение выполнения времени доставки, определяется по уравнению:

$$\sigma_t = \sqrt{D_t}. \quad (8)$$

Следовательно, согласно уравнению (8) среднестатистическое квадратичное отклонение выполнения времени доставки равно 28,3.

Данные наблюдений, показанные в графах 3 и 5 таблицы 3, представим в виде гистограммы (рисунок). После того, как числовые характеристики статистического ряда были рассчитаны, перейдем к выбору кривой распределения, которая более полно характеризует данное распределение. Распределение, которое соответствует этой кривой, мы назовем теоретическим распределением.

Все изложенное выше дает возможность определения выполнения или невыполнения обработки поезда по отправлению на основе нормального закона распределения.

Выбор закона, с достаточной точностью описывающего статистическое распределение случайной величины, осуществляется исходя из физической природы (сущности) исследуемого процесса и явления. При этом внешний вид гистограммы или многоугольника и числовые характеристики статистического ряда могут служить дополнительным признаком. Например, для закона нормального распределения случайной величины весь разброс (с точностью до одного процента) $t_{cp} \pm 3\sigma_t$ расположится на данном участке.

Координаты теоретической кривой распределения случайной величины, вероятность попадания случайной величины в определенный интервал, т. е. в исследуемом случае вероятность обработки контейнерного блок-трейна в разряде (см. таблицу 3, графу 8), определяются вычислением ее вероятности в разряде.

Исходя из того, что внешний вид многоугольника в гистограмме на рисунке характеризует нормальный закон распределения, вероятность попадания случайной величины на определенный интервал $p_{H(i)}$ определяется по формуле:

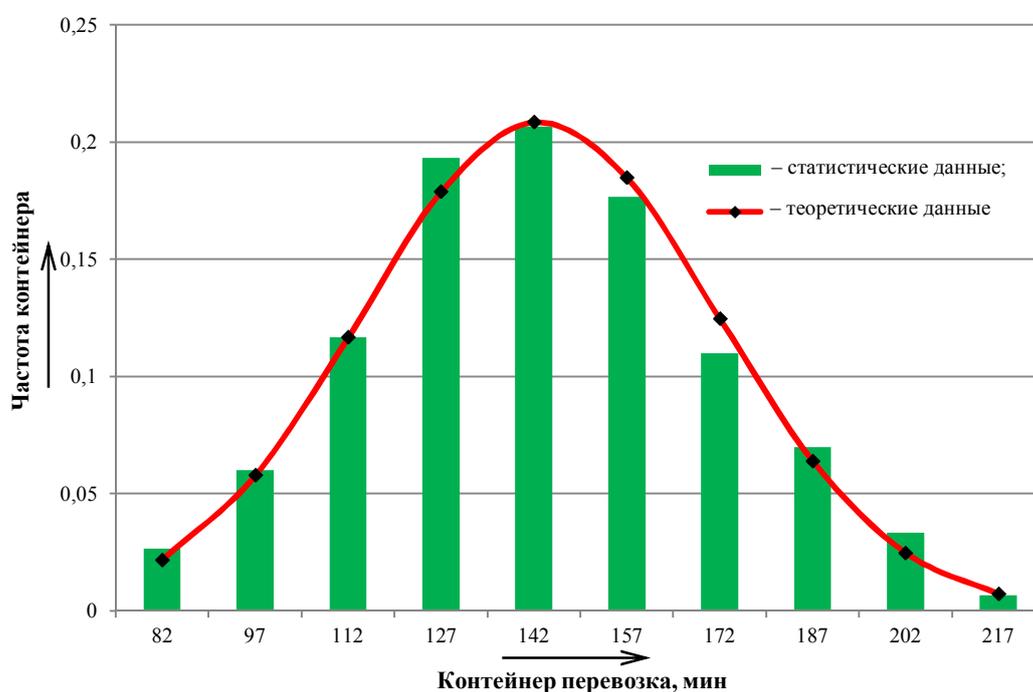
$$P(h_{i(\min)} \leq p_{H(i)} \leq h_{i(\max)}) = F(h_{i(\max)}) - F(h_{i(\min)}), \quad (9)$$

где $F(h_i)$ – функция закона нормального распределения.

При этом вероятность обработки контейнерного блок-трейна, соответствующая первому разряду (см. таблицу 3, графу 8), была определена согласно формуле (9) следующим образом:

$$P(74,5 \leq p_{H(i)} \leq 89,5) = -0,011 - (-0,499) = 0,488.$$

Корректность аппроксимации в соответствии с законом нормального распределения выполнения сроков поставки проверена по критерию согласия К. Пирсона (критерий согласия χ^2 (хи-квадрат)) [1, 3].



Гистограмма распределения случайной величины для обработки контейнерного блок-трейна на станциях примыкания к железнодорожному терминалу, мин

Значение χ^2 определим по формуле (см. таблицу 3, графу 10):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^j \frac{(n_i - f_i)^2}{f_i}, \quad (10)$$

где f_i – теоретическая вероятность нахождения случайной величины в i -интервале, количество теоретических наблюдений в исследуемом случае при разряде (см. таблицу 3, графу 9).

Как видно из рисунка, статистические и теоретические распределения полученных результатов близки между собой, а также результаты, полученные по статистическим сведениям, почти совпадают с рассчитанными согласно закону нормального распределения.

Аппроксимации о взаимном соответствии статистических данных и теоретической кривой нормального распределения были осуществлены в соответствии с критерием В. И. Романовского [3]. Согласно правилу В. И. Романовского если

$$\frac{\chi^2 - r}{\sqrt{2r}} \leq 3, \quad (11)$$

то считается, что принятый закон распределения удовлетворительно описывает и показывает статистическое распределение.

При этом r – число степеней свободы:

$$r = k - s, \quad (12)$$

где k – количество групповых интервалов;

s – количество независимых условий (для нормального распределения принято $s = 3$ [4]).

Корректность аппроксимации сокращения времени технологических операций по отправлению была проверена по закону нормального распределения по критерию В. И. Романовского, в ходе исследования данные по формуле (11) принимали следующие значения: $0,78 < 3$. Это, в свою очередь, показывает, что аппроксимация сокращения времени на технологические операции по отправлению по нормальному закону распределения не противоречит этому наблюдению. Сокращение времени на технологические операции по отправлению было обработано с использованием математической статистики и доказана возможность его определения на основе нормального закона распределения. Также выполнен критерий согласия Пирсона (значения критерия согласия были менее трех во всех исследованных случаях).

Исходя из исследований на основании нормального закона распределения можно прийти к выводу о достоверности полученных результатов по рассматриваемым технологиям обработки контейнерного блок-трейна по отправлению на станции примыкания к железнодорожному терминалу. Так, время на технологические операции у грузового поезда будет составлять 154 мин, а контейнерного блок-трейна – 132 мин. Сокращение времени на обработку контейнерного блок-трейна на станциях отправления происходит за счет выполнения основных технологических задач и накопления контейнерных поездов на железнодорожных терминалах, что в свою очередь даст возможность грузоотправителям надежной и ускоренной доставки широкой номенклатуры контейнеропригодных товаров.

Список литературы

1. Кобулов, Ж. Р. Организация движения сборных поездов между техническими станциями при доставке грузов / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 104–111.
2. Кобулов, Ж. Р. Проблемы и решения своевременной доставки грузов на железнодорожном транспорте / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов, И. М. Тоштемиров. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2021. – № 11. – С. 16–21.
3. Mukhamedova Z. Modelling of fluctuations in the main bearing frame of railcar. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 48-53.
4. Кобулов, Ж. Р. Совершенствование математической модели срока доставки груза повагонной отправки на железнодорожном транспорте / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 129–138.
5. Мухамедова, З. Г. Определение оптимальной периодичности технического обслуживания аварийно-восстановительных автотоматрис / З. Г. Мухамедова, Ж. С. Баротов, М. С. Ташматова. – Текст : непосредственный // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 46. – С. 1074–1080.
6. Кобулов, Ж. Р. Совершенствование выполнения сроков доставки грузов повагонных отправок методом математической статистики / Ж. Р. Кобулов, Ж. С. Баротов, М. С. Ташматова. – Текст : непосредственный // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 46. – С. 842–854.
7. Баротов, Ж. С. Повышение коэффициента использования грузоподъемности рефрижераторного контейнера / Ж. С. Баротов. – Текст : непосредственный // Форум

логистики: будущее логистики глазами молодых ученых : сборник материалов международной форсайт-сессии / Санкт-Петербургский гос. экон. ун-т. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 24–28.

8. Туранов, Х. Т. Определение кинематических параметров движения вагона на участках тормозных позиций сортировочной горки / Х. Т. Туранов, Ш. У. Саидивалиев. – Текст : непосредственный // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2019. – Т. 9. – № 1. – С. 21–26.

9. Mukhamedova Z., Fayzibayev S., Ergasheva Z. Improving the Design Concepts of Equipment for the Assembly Platform of a Rail Service Car Considering Reliability Rates and Real State. *IP Conference Proceedings*, 2022, 2432, 030052.

10. Мухамедова, З. Г. К вопросу о развитии транспортной инфраструктуры Узбекистана / З. Г. Мухамедова, З. В. Эргашева, Э. А. Асатов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 105–114.

11. Kobulov J., Barotov J. Improving the delivery of wagon shipments by mathematical-statistical methods. *E3S Web of Conferences*, 2021, 264, 05007.

12. Мухамедова, З. Г. К вопросу о развитии терминальной деятельности с использованием технологии блок-поездов/ З. Г. Мухамедова, З. В. Эргашева, М. Р. Дильбарова. – Текст : непосредственный // Транспорт и логистика: актуальные проблемы стратегического развития и оперативного управления : Материалы международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2022. – С. 139–142.

References

1. Kobulov J.R., Barotov J.S. Organization of traffic of assembled trains between technical stations for delivery of goods. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 4 (44), pp. 104-111 (In Russian).

2. Kobulov J.R., Barotov J.S., Toshtemirov I.M. Problems and solutions of timely delivery of goods by rail. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik – Transport: science, equipment, management. Scientific information collection*, 2021, no. 11, pp. 16-21 (In Russian).

3. Mukhamedova Z. Modelling of fluctuations in the main bearing frame of railcar. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 48-53.

4. Kobulov J.R., Barotov J.S. Improvement of the mathematical model of the delivery time of wagonload cargo by rail. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 4 (48), pp. 129-138 (In Russian).

5. Mukhamedova Z.G., Barotov J.S., Tashmatova M.S. Determination of the optimal frequency of maintenance of emergency recovery vehicles. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie – Innovation. The science. Education*, 2021, no. 46, pp. 1074-1080 (In Russian).

6. Kobulov J.R., Barotov J.S., Tashmatova M.S. Improving the fulfillment of the terms of delivery of goods by wagon shipments by the method of mathematical statistics. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie – Innovation. The science. Education*, 2021, no. 46, pp. 842-854 (In Russian).

7. Barotov J.S. [Increasing the utilization factor of the refrigerated container load capacity]. *Forsait logistiki: budushchee logistiki glazami molodykh uchenykh: sbornik materialov mezhdunarodnoi forsait-sessii* [Foresight of logistics: the future of logistics through the eyes of young scientists : a collection of materials of the international foresight session]. Saint Petersburg, 2018, pp. 24-28 (In Russian).

8. Turanov Kh.T., Saidivaliev Sh.U. Determination of the kinematic parameters of the carriage movement in the sections of the brake positions of the sorting slide. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii – Modern Problems of Russian Transport Complex*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 21-26 (In Russian).

9. Mukhamedova Z., Fayzibayev S., Ergasheva Z. Improving the Design Concepts of Equipment for the Assembly Platform of a Rail Service Car Considering Reliability Rates and Real State. *IP Conference Proceedings*, 2022, 2432, 030052.

10. Muhamedova Z.G., Ergasheva Z.V., Asatov E.A. On the development of transport infrastructure in uzbekistan. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 2 (46), pp. 105-114 (In Russian).

11. Kobulov J., Barotov J. Improving the delivery of wagon shipments by mathematical-statistical methods. *E3S Web of Conferences*, 2021, 264, 05007.

12. Mukhamedova Z.G., Ergasheva Z.V., Dil'barova M.R. [On the issue of the development of terminal activities using block train technology]. *Transport i logistika: aktual'nye problemy strategicheskogo razvitiia i operativnogo upravleniia: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Transport and logistics: actual problems of strategic development and operational management: Materials of the international scientific and practical conference]. Rostov-on-Don, 2022, pp. 139-142 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Эргашева Захро Валижонова

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Мирабадский район, улица Темирийўлчилар, д. 1, г. Ташкент, 100067, Республика Узбекистан.

Старший преподаватель кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: +998 (97) 716-23-22.

E-mail: zahro2@yandex.ru

Баротов Жамшид Сайфуллаевич

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Мирабадский район, улица Темирийўлчилар, д. 1, г. Ташкент, 100067, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: +998 (91) 778-10-11.

E-mail: jamshid-uzb92@mail.ru

Самиев Фаррухжон Кахрамонович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Мирабадский район, улица Темирийўлчилар, д. 1, г. Ташкент, 100067, Республика Узбекистан.

Ассистент кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: +998 (71) 299-05-10.

E-mail: samiyev1986@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Эргашева, З. В. Совершенствование технологии обработки контейнеров в составе блок-трейна по отправлению на станции примыкания железнодорожного терминала / З. В. Эргашева, Ж. С. Баротов, Ф. К. Самиев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 3 (55). – С. 73 – 83.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ergasheva Zakhro Valijonovna

Tashkent State of Transport University (TSTU).

Mirabad distarict, Temir st., 1, Tashkent, 100067, Republic of Uzbekistan.

Senior lecturer of the department «Transport and cargo systems», TSTU.

Phone: +998 (97) 716-23-22.

E-mail: zahro2@yandex.ru

Barotov Jamshit Sayfullaevich

Tashkent State of Transport University (TSTU).

Mirabad distarict, Temir st., 1, Tashkent, 100067, Republic of Uzbekistan.

Ph.D. in Engineering, Associate professor of the department «Transport and cargo systems», TSTU.

Phone: +998 (91) 778-10-11.

E-mail: jamshid-uzb92@mail.ru

Samiev Farruxjon Kaxramonovich

Tashkent State of Transport University (TSTU).

Mirabad distarict, Temir st., 1, Tashkent, 100067, Republic of Uzbekistan.

Assistant of the department «Transport and cargo systems», TSTU.

Phone: +998 (71) 299-05-10.

E-mail: samiyev1986@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ergasheva Z.V., Barotov J.S., Samiev F.K. Improving the container handling technology as part of the block train for departure at the junction station of the railway terminal. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 3 (55), pp. 73-83 (In Russian).

Ю. А. Колебер, С. М. Мочалин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Российская Федерация

ЛОГИСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы логистики городских пассажирских перевозок. Обоснована актуальность применения логистического подхода к управлению системой городского пассажирского транспорта общего пользования. Отмечено, что применение рычагов логистики в этой области имеет благоприятную тенденцию относительно развития транспортной отрасли и региона в целом. Рассмотрены подходы к определению и разграничению понятий «городская логистика» и «логистика городского пассажирского транспорта общего пользования». Обоснована важность применения системного подхода в решении вопросов логистики городских пассажирских перевозок. Городской пассажирский транспорт общего пользования представлен как сложная динамическая система, при этом раскрыты специфика и иерархия этой системы, показано, что она требует эффективных управленческих решений, основанных на интеграции и синхронизации. Подробно описана макрологистическая система городского пассажирского транспорта общего пользования, показаны взаимосвязи как между ее элементами, так и между самой системой и внешней средой. Отражено функциональное назначение элементов системы как самостоятельных микрологистических систем. Описаны логистические потоки и цели их функционирования в системе городских пассажирских перевозок. Изложена специфика пассажирского и сервисного потоков. Показано, что участники системы городского пассажирского транспорта общего пользования преследуют разные цели, это в результате делает задачу оптимизации процесса пассажирских перевозок в городе достаточно сложной и многокритериальной. Описаны социальная составляющая логистики городского пассажирского потока, ее взаимосвязь с экономическими результатами системы. Отмечены актуальность и необходимость развития как теоретических, так и практических разработок в области логистики городских пассажирских перевозок.

Ключевые слова: логистика, городской пассажирский транспорт общего пользования, макрологистическая система, микрологистическая система, логистический поток.

Yuliya A. Koleber, Sergej M. Mochalin

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, the Russian Federation

LOGISTICS SYSTEM OF PUBLIC URBAN PASSENGER TRANSPORT

Abstract. The article deals with the logistical issues of urban passenger transportation. It substantiates the urgency of the application of logistical approaches in the management of the public transportation system. It was noted that the leverage of logistical methods in this area benefits the development of the transport sector and the region in general. It considers the approaches of determining and distinguishing such concepts like «city logistics» and «logistics of the urban public transport». The importance of applying a systematic approach in solving the issues of urban passenger transportation logistics is substantiated. Public urban passenger transport is presented as a complex dynamic system, while the specifics and hierarchy of this system are revealed. It is shown that it requires effective management decisions based on integration and synchronization. The macrologistic system of public urban passenger transport is described in detail, the interrelations between its elements and between the system itself and the external environment are shown. The functional purpose of the system elements as independent micrologistic systems is reflected. It describes the logistical flows and the purposes of their functioning in the system of urban public transport. The specificity of the passengers and services flows is provided. It is presented that all participants of the system are pursuing different goals, which makes the task of optimizing the process of passenger transportation in the city quite difficult and multi-criteria. It describes the social logistical part of the public passenger traffic, their connection with the economic results of the system. The relevance and necessity of developing theoretical as well as practical knowledge in the area of public transportation logistics are noted.

Keywords: logistics, public urban transport, macrological system, micrologistic system, logistics flow.

В настоящее время в условиях рынка потребителя возрастает роль логистического подхода к организации процесса оказания услуг, в том числе и транспортных. Высокая результативность логистических подходов к организации грузовых перевозок открывает

возможность перспективного и обоснованного развития теории и практики «пассажирской логистики».

Эффективность функционирования систем городского пассажирского транспорта общего пользования (СГПТОП) благоприятно сказывается на развитии регионального транспортного комплекса, его экономических показателях. В то же время СГПТОП являются достаточно сложными и стохастическими системами, требующими координации всех участников транспортного процесса. Однако на сегодняшний день во многих СГПТОП крупных городов существует достаточно широкий круг проблем. Среди них можно выделить нерациональную структуру парка подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования (ГПТОП) по вместимости, дублирование маршрутов, высокий коэффициент пересадочности, низкий уровень комфорта пассажира при поездке и др. Кроме того, во многих СГПТОП наблюдаются бессистемность, слабая координация и синхронизация управленческих решений. Все это обосновывает необходимость применения логистического подхода к управлению городскими пассажирскими потоками.

Стоит отметить, что в настоящее время слабо проработаны и формализованы подходы к определению логистики ГПТОП. В то же время следует различать понятия «городская логистика» и «логистика ГПТОП». Городская логистика (City-Logistik) – более емкое понятие и включает в себя вопросы организации не только пассажирских перевозок в черте города, но и грузовых.

Понятие городской логистики рассмотрено в работах [1, с. 14; 2, с. 128]. Авторы данных работ сходятся в том, что городская логистика занимается оптимизацией процесса городских грузовых и пассажирских перевозок в целях содействия гармоничному развитию городской среды.

Логистика ГПТОП ориентируется на вопросы организации перевозок пассажиров в городе пассажирским транспортом общего пользования и совершенствование работы маршрутной системы. Определение логистики ГПТОП изложено в работах [3, с. 97; 4, с. 41; 5, с. 9; 6, с. 19, 20]. Однако наиболее емкое из них, с точки зрения авторов статьи, изложено в работе Миротина Л. Б. [6, с. 19, 20]. Логистика ГПТОП рассматривается им как совокупность проектных решений, технических средств и методов организации и управления, которые обеспечивают заданный уровень обслуживания пассажиров, их безопасную, надежную и непрерывную доставку «от двери до двери» в определенное время при минимальных затратах [6, с. 19, 20].

Анализ указанных работ и учет специфики логистического подхода позволяют авторам определить логистику ГПТОП как систему по организации движения пассажирского потока в городском сообщении с сопутствующими информационными, финансовыми, материальными потоками точно в срок, с минимальными затратами при заданном уровне качества обслуживания пассажиров, который определяется исходя из оценки сервисного потока на выходе системы.

Данное определение обосновывает необходимость рассмотрения СГПТОП как логистической системы. Системный подход к управлению СГПТОП обусловлен следующими факторами. Сложный характер взаимосвязей внутри самой рассматриваемой системы с одной стороны, с другой стороны – наличие большого количества факторов внешней среды, оказывающих непосредственное влияние на систему, наличие общей целевой функции системы в целом, несмотря на расхождение интересов между ее участниками, наличие строгой иерархии внутри системы, способность системы непрерывно функционировать в постоянных условиях неопределенности.

Согласно работе [6, с. 24] логистическая система – это сложное организационно-экономическое целое, выполняющее функции управления материальными, сервисными и сопутствующими им информационными и финансовыми потоками.

Системный анализ СГПТОП позволяет осуществить ее декомпозицию: определение основных подсистем с их функциональными признаками.

Начать нужно с того, что ГПТОП – это часть более крупной системы города, обеспечивающая его социальную и экономическую стабильность [7, с. 31]. Исходя из этого, цели СГПТОП должны соответствовать потребностям городской среды в целом. Так, ГПТОП увеличивает мобильность населения в черте города, обеспечивает социально-экономическую эффективность городской жизнедеятельности, повышает уровень коммуникации между районами города и в то же время способствует созданию экономически стабильного и продуктивного городского центра. Согласно работе [8, с. 156, 157] ГПТОП способствует экономии общественных затрат, оживлению районов проживания, увеличению клиентской базы для предприятий розничной торговли, общественного питания, медицинских учреждений и т. д.

В то же время сама СГПТОП любого крупного города выступает в качестве макрологистической системы со всеми присущими ей признаками. Согласно работе [6, с. 14, 15] макрологистическая система создается на уровне административно-территориального образования для решения главным образом социально-экономических задач. Опираясь на классификацию логистических систем пассажирского транспорта, представленную в работе [6, с. 27 – 29], авторы сформировали классификационные характеристики логистической системы ГПТОП, представленные на рисунке 1.

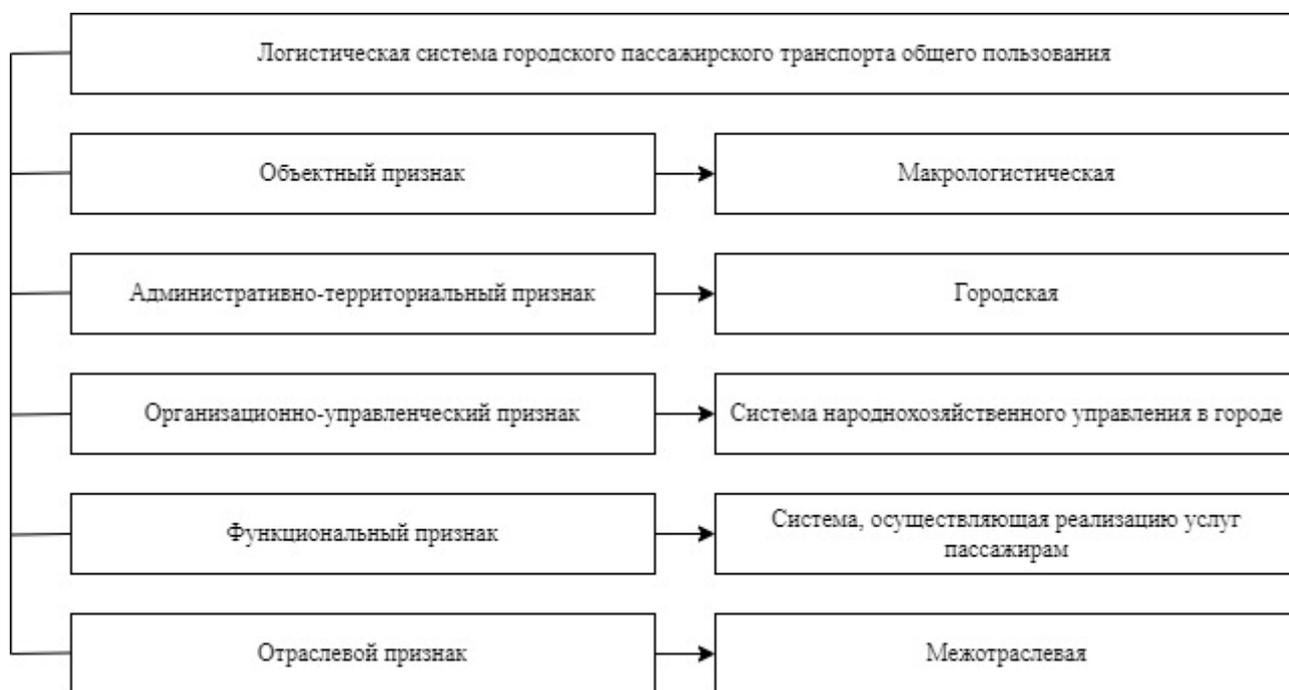


Рисунок 1 – Классификационные характеристики логистической системы ГПТОП

Стоит отметить, что описываемая система (см. рисунок 1) является межотраслевой потому, что на городской маршрутной сети функционирует не только автомобильный транспорт, но и электрический: троллейбусы, трамваи, метрополитен, электропоезда, электробусы, монорельсы, фуникулеры.

Главное назначение макрологистической системы ГПТОП – обеспечение бесперебойного, эффективного перевозочного процесса в городе с применением ГПТОП при минимизации затрат на перевозки и максимизации показателей качества транспортного обслуживания пассажиров.

Авторами разработана типовая структура макрологистической системы ГПТОП, которая представлена на рисунке 2. Стоит отметить, что такая структура применима для любого крупного города.

Далее следует подробно описать все взаимосвязи в рассматриваемой системе.

На основании изучения понятия «микрологистической системы» в источниках [6, с. 14; 9, с. 89] можно сформулировать ее определение для СГПТОП. Микрологистические системы в области ГПТОП – это подсистемы или структурные составляющие макрологистических систем, основным назначением которых является оптимизация и управление внутренними логистическими потоками при одновременном участии в процессе обеспечения бесперебойного функционирования ГПТОП и оказания транспортной услуги пассажирам.

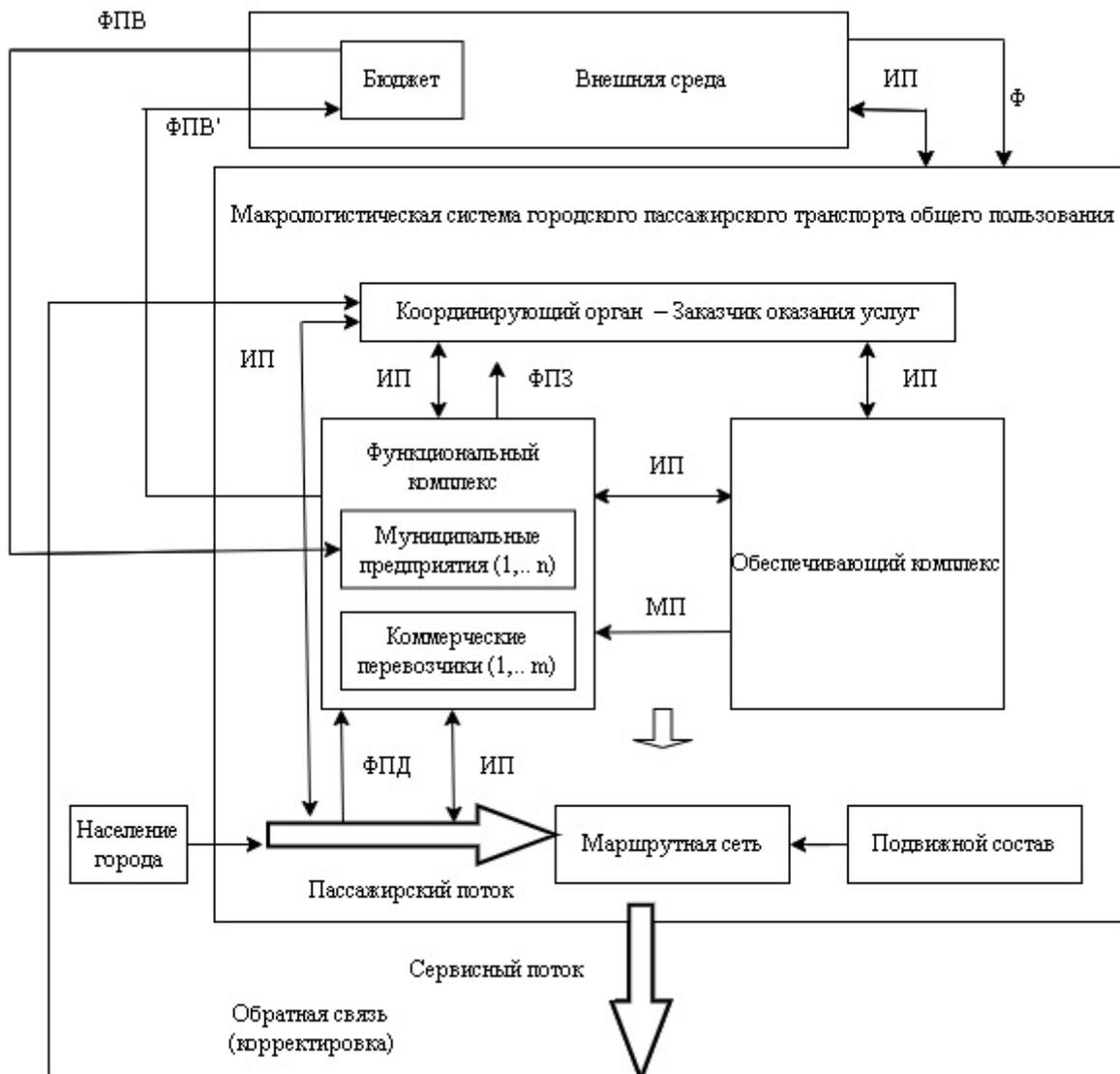


Рисунок 2 – Макрологистическая система ГПТОП и ее структура

Главными подсистемами макрологистической системы ГПТОП, или микрологистическими системами являются непосредственно участники транспортного процесса (заказчик транспортных услуг в лице Департамента транспорта города, предприятия функционального комплекса – перевозчики, пассажиры) и предприятия обеспечивающего комплекса. При этом пассажиры являются входящей подсистемой и в самой системе уже представляют собой пассажирский поток (см. рисунок 2). Характеристики пассажирского потока важны для формирования матрицы корреспонденций, оценки потенциала подвижного состава ГПТОП, формирования оптимальной маршрутной сети. Иными словами, размер пассажирского потока является основой для планирования работы всей СГПТОП. Однако на выходе системы важны уже не характеристики самого пассажирского потока, а получаемые в результате его обслуживания характеристики сервисного потока (см. рисунок 2). Это соответствует утверждению о том, что пассажир является как потребителем услуги, так и активным

участником транспортного процесса. Автор диссертации [10, с. 14] называет подобное преобразование пассажирского потока в сервисный поток трансформацией логистических потоков за счет синергетического подхода и синхронизации потоковых процессов в системе.

Согласно работе [6, с. 26] сервисный поток представляет собой пассажирские услуги, оказываемые предприятиями общественного транспорта пассажирам для их перемещения во времени и пространстве. С точки зрения авторов, сервисный поток в СГПТОП – это результат оказания транспортной услуги пассажирам, выраженный в качественных показателях работы ГПТОП. Это такие показатели, как доступность, надежность, комфортность и др. Наиболее подробно они описаны в социальном стандарте транспортного обслуживания населения [11].

Главный координирующий орган в рассматриваемой системе – это заказчик транспортных услуг. Он выступает в роли подсистемы управления и контролирует, синхронизирует деятельность перевозчиков с учетом параметров городской маршрутной сети, потребностей пассажиров, а также контролирует деятельность звеньев обеспечивающего комплекса. Контроллинг процесса оказания услуг по перевозке пассажиров должен достигаться за счет обратной связи (см. рисунок 2). При сопоставлении данных о пожеланиях пассажиров относительно организации транспортного обслуживания в городе (за счет циркуляции между рассматриваемыми подсистемами информационного потока) и характеристик сервисного потока на выходе системы заказчик транспортных услуг может применять корректирующие решения.

Функциональный и обеспечивающий комплексы являются подсистемами и состоят из совокупности звеньев (предприятий) в рассматриваемой макрологистической системе.

Функциональный комплекс управляет основной логистической функцией – транспортировкой – и непосредственно организует процесс перевозки пассажиров на полномочиях, выданных им заказчиком транспортных услуг. Это, как правило, муниципальные предприятия и коммерческие перевозчики. Их главная цель – извлечение прибыли от перевозочной деятельности.

Обеспечивающий комплекс осуществляет необходимое организационное, экологическое и материальное обеспечение процесса перевозки пассажиров. По своей специфике он обеспечивает функциональный блок не только информационными потоками, но и материальными потоками (МП) (см. рисунок 2). Его главная цель – всестороннее, непрерывное содействие транспортному обслуживанию населения города предприятиями функционального комплекса.

Важными элементами макрологистической системы ГПТОП являются городская маршрутная сеть и подвижной состав ГПТОП. Маршрутная сеть определяет характеристики перевозочного процесса в наборе множества показателей, таких как маршрутный коэффициент, коэффициент непрямолинейности маршрутов, коэффициент пересадочности и др. Подвижной состав ГПТОП влияет на условия комфорта поездки пассажира в транспортном средстве и определяется такими показателями, как динамический коэффициент использования вместимости, время ожидания посадки в транспортное средство и др. Логистический подход к управлению ГПТОП предусматривает оптимизацию маршрутной сети с целью улучшения показателей качества обслуживания пассажиров. В то же время формирование оптимальной структуры парка подвижного состава ГПТОП по вместимости позволит экономить затраты на капитальные вложения в подвижной состав и эксплуатационные расходы на пробег.

Все взаимодействия внутри системы осуществляются за счет циркуляции между рассматриваемыми подсистемами многочисленных информационных потоков (ИП) (см. рисунок 2). Так, со стороны пассажира перевозчикам идет информация об объемах перевозок, а в случае оплаты проезда картами через банк-провайдер электронных платежей перевозчикам поступает информация о поступлении денежных средств на счет [12, с. 131].

Информационная взаимосвязь происходит также между пассажиром и организатором перевозок: пассажиры направляют информацию, содержащую замечания и предложения, а организатор перевозок информирует пассажиров о параметрах работы СГПТОП. Перевозчики

взаимодействуют с организатором перевозок путем обмена информационными потоками главным образом с помощью системы ГЛОНАСС. В данную систему поступает информация о местонахождении подвижного состава на линии, в результате формируются отчетные данные о работе ГПТОП и о выполнении маршрутных расписаний, которые напрямую поступают организатору перевозок. На основе поступившего информационного потока организатор перевозок направляет соответствующие замечания и корректирующие воздействия напрямую перевозчикам и в то же время информирует пассажиров о работе системы.

Поскольку предприятия функционального комплекса в свою очередь также являются самостоятельными микрологистическими системами, внутри них также циркулируют информационные потоки. Так, водителям подвижного состава в начале смены поступает сменное задание, результаты выполнения которого в виде информации о выполненных рейсах, выручке и пробеге водители передают руководству.

С внешней средой макрологистическая система ГПТОП также взаимодействует путем функционирования информационных потоков как входящих, так и исходящих. Это как запросы внешней среды, так и результаты процесса перевозки пассажиров, оказывающие непосредственное влияние на внешнюю среду и выражающиеся в определенном наборе показателей.

В рассматриваемую систему поступает внешний финансовый поток (ФПВ) (см. рисунок 2) в виде дотационных выплат, направленных на покрытие расходов по перевозке пассажиров муниципальными предприятиями. На выходе как муниципальные предприятия, так и коммерческие перевозчики отправляют в муниципальный бюджет налоговые отчисления – выходящий финансовый поток (ФПВ') (см. рисунок 2). В то же время от пассажиров к перевозчикам поступает финансовый поток в виде платы за проезд, в том числе и по социальным картам (ФПД) (см. рисунок 2). Это доходный для перевозчиков финансовый поток. Затратный финансовый поток функционального комплекса (ФПЗ) (см. рисунок 2) – это затраты на оплату труда персонала, затраты на содержание и эксплуатацию подвижного состава ГПТОП, затраты на содержание производственной базы и др.

Особенности логистического подхода в оптимизации движения потоков в СГПТОП заключаются в объединении разрозненных логистических потоков в единые сквозные потоки, в формировании единой функции управления, а также в интеграции отдельных звеньев системы в единую систему [12, с. 131].

На макрологистическую систему ГПТОП непосредственное влияние оказывают также факторы внешней среды (Ф) (см. рисунок 2): экономические, политические, социальные, временные, демографические, правовые, технические, технологические [13, с. 20]. В процессе управления СГПТОП с точки зрения логистического подхода следует учитывать все перечисленные выше факторы.

Цели участников транспортного процесса часто противоречат друг другу. Это значительным образом усложняет логистическую координацию и интеграцию внутри системы [14, с. 102]. В таблице приведены цели и показатели, которыми оцениваются результаты функционирования СГПТОП для каждого из главных участников транспортного процесса в городе.

Данные приведенной таблицы свидетельствуют о частичном расхождении интересов главных участников транспортного процесса. Наиболее остро это проявляется в следующем: в то время как пассажир стремится к снижению транспортного тарифа, перевозчик заинтересован в его повышении, стремясь к увеличению дохода от перевозок. Задача заказчика транспортных услуг – найти баланс в данном конфликте интересов, поскольку для социально-экономического благополучия города важен экономический эффект от перевозок, который зависит в том числе и от привлекательности пассажирских услуг. В связи с этим в настоящее время достаточно актуальной является задача формирования

интегрального показателя качества СГПТОП с учетом интересов всех трех сторон перевозочного процесса.

Цели функционирования участников транспортного процесса в городе

Участник	Цель участника	Результативные показатели
Пассажир	Повышение показателей качества транспортного обслуживания	Доступность, надежность, комфортность и др. (наиболее подробно отражены в социальном стандарте транспортного обслуживания населения [11])
Перевозчик	Увеличение доходов деятельности и улучшение показателей работы	Доходы, фондоотдача, коэффициент регулярности, коэффициент выпуска и др. (наиболее подробно отражены в работе [15, с. 250])
Заказчик транспортных услуг	Повышение уровня показателей, влияющие на социально-экономическое развитие города	Коэффициент ценовой доступности поездок, доля транспортных средств, оснащенных системой ГЛОНАСС, и др. (наиболее подробно отражены в социальном стандарте транспортного обслуживания населения [11] и в работе [16, с. 168 – 182])

Реализация логистических функций управления в СГПТОП позволяет непрерывно оптимизировать работу системы на всех этапах и применять своевременные корректирующие воздействия в случае выявления их необходимости. В результате можно говорить о тождественности логистического подхода к управлению СГПТОП и оптимизации перевозочного процесса в городе [17, с. 603].

Особенность логистики ГПТОП заключается не только в достижении экономического эффекта, но и в наличии социальной составляющей, которая выражается в необходимости доставки пассажиров к местам приложения труда, досуга. Учет человеческого фактора необходим в условиях логистического управления пассажирским потоком. Главное в социальной составляющей логистики ГПТОП – это государственная политика, направленная на обеспечение гарантий и социальной защиты населения, не имеющего возможности перемещаться по городу с использованием личных легковых автомобилей. Немаловажную роль здесь играет обслуживание по специальным тарифам льготных категорий пассажиров (пенсионеров, школьников).

Социальный эффект достигается также при сокращении времени передвижения трудовых ресурсов, что улучшает качество жизни населения города. В то же время сокращение времени передвижения пассажиров благоприятно отражается на экономическом эффекте за счет снижения показателя транспортной усталости. Подобное взаимовлияние экономического и социального эффектов работы ГПТОП обуславливает необходимость формирования эффективных рычагов развития СГПТОП с применением логистического подхода.

В настоящее время слабо проработаны теоретические аспекты логистики городских пассажирских перевозок. Обусловлено это тем, что в логистике ключевое значение уделяется материальному потоку, при этом управление пассажирским потоком отходит на второй план [18, с. 17]. В то же время слабо проработаны рычаги практического применения принципов логистического управления в СГПТОП. Все это обосновывает актуальность дальнейшего изучения вопросов потенциала логистики в области городских пассажирских перевозок.

Результаты проведенного авторами исследования позволяют сформировать четкое понятие сущности логистики ГПТОП, дают основу для формирования теоретической базы в рассматриваемой области, обосновывают необходимость и раскрывают сущность системного подхода применительно к управлению ГПТОП, дают возможность рассматривать СГПТОП как макрологистическую систему с множеством взаимосвязей между ее элементами и с описанием логистических потоков, раскрывают понятийный аппарат в рассматриваемой

области, описывают цели участников логистической системы ГПТОП; показывают сущность социального аспекта логистики городских пассажирских перевозок.

Список литературы

1. Cvahte, Ojsteršek T. Challenges of city logistics / Ojsteršek T. Cvahte, D. Topolšek. – Текст : непосредственный // Логистические системы в глобальной экономике. – 2019. – № 9. – С. 13–16.
2. Абросимова, А. А. Информационное обеспечение процессов городской логистики / А. А. Абросимова. – Текст : непосредственный // Вопросы студенческой науки. – 2020. – № 11 (51). – С. 128–133.
3. Дашко, Ю. В. Нейронные сети и логистика городских пассажирских перевозок / Ю. В. Дашко, А. А. Заика. – Текст : непосредственный // Бизнес. Образование. Право. – 2009. – № 9. – С. 96–106.
4. Климова, В. В. Анализ направлений развития городской логистики и формирования цифровых технологий / В. В. Климова, О. А. Зюрина. – Текст : непосредственный // Вестник СамГУПС. – 2019. – № 2 (44). – С. 39–46.
5. Жук, А. Е. Ценностно ориентированное развитие логистических систем городского общественного пассажирского транспорта : специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством (логистика)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Жук Андрей Евстафьевич ; Санкт-Петербургский гос. экон. ун-т. – Санкт-Петербург, 2021. – 244 с. – Текст : непосредственный.
6. Логистика: общественный пассажирский транспорт : учебник для студентов экономических вузов / под общ. ред. Л. Б. Миротина. – Москва : Экзамен, 2003. – 224 с. – Текст : непосредственный.
7. Гузенко, А. В. Формирование современных систем управления городским пассажирским транспортом на принципах логистики / А. В. Гузенко, Е. С. Вальчук. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). – 2015. – № 3 (51). – С. 30–35.
8. Рахматуллина, А. Р. Роль общественного транспорта в развитии современных городов / А. Р. Рахматуллина. – Текст : непосредственный // Вестник университета. – 2014. – № 8. – С. 154–157.
9. Логистика : учебник / А. М. Гаджинский. – Москва : Дашков и К°, 2012. – 484 с. – Текст : непосредственный.
10. Трегубов, В. Н. Функциональное обеспечение синхронизации в логистических системах общественного пассажирского транспорта : специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством (логистика)» : диссертация на соискание ученой степени доктора экономических наук / Трегубов Владимир Николаевич ; Саратовский гос. техн. ун-т. – Санкт-Петербург, 2011. – 334 с. – Текст : непосредственный.
11. Распоряжение Министерства транспорта Российской Федерации от 31 января 2017 г. № НА-19-р «Об утверждении социального стандарта транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом». – Москва : Министерство транспорта Российской Федерации, 2017. – 20 с. – Текст : непосредственный.
12. Дрючин, Д. А. Организация движения информационных и финансовых потоков в системе городского пассажирского общественного транспорта / Д. А. Дрючин. – Текст : непосредственный // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2016. – № 3. – С. 129–134.
13. Болтенко, Ю. А. Модель логистической системы общественного пассажирского транспорта / Ю. А. Болтенко. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 26 (130). – С. 18–20.

14. Несиоловская, Т. Н. Логистический подход к организации городских пассажирских перевозок / Т. Н. Несиоловская. – Текст : непосредственный // Теоретическая экономика. – 2022. – № 12. – С. 101–110.

15. Мочалин, С. М. Оценка результатов работы муниципального пассажирского транспорта общего пользования в городе Омске / С. М. Мочалин, М. Е. Каспер. – Текст : непосредственный // Вестник СибАДИ. – 2018. – № 2 (60). – С. 249–259.

16. Федоров, В. А. Логистические принципы управления как основа повышения качества и эффективности транспортного обслуживания населения / В. А. Федоров. – Текст : непосредственный // Проблемы региональной экономики: теория и практика : сборник материалов международной научной конференции / Международный центр научно-исследовательских проектов. – Киров, 2014. – С. 168–182.

17. Каспер, М. Е. Внедрение логистических принципов в практику работы городского общественного пассажирского транспорта / М. Е. Каспер. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых : материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Министерство образования и науки Российской Федерации; Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). – Омск, 2017. – С. 600–604.

18. Болтенко, Ю. А. Содержание и проблемы логистики общественного пассажирского транспорта / Ю. А. Болтенко. – Текст : непосредственный // Техника и технологии строительства. – 2016. – № 4 (8). – С. 14–19.

References

1. Cvahte Ojsteršek T., Topolšek D. Challenges of city logistics. *Logisticheskie sistemy v global'noj jekonomike – Logistics systems in the global economy*, 2019, no. 9, pp. 13-16 (In Russian).

2. Abrosimova A.A. Information support of urban logistics processes. *Voprosy studencheskoj nauki – Questions of student science*, 2020, no. 11 (51), pp. 128-133 (In Russian).

3. Dashko Ju.V., Zaika A.A. Neural networks and logistics of urban passenger transportation. *Biznes. Obrazovanie. Pravo – Business. Education. Right*, 2009, no. 9, pp. 96-106 (In Russian).

4. Klimova V.V., Zjurina O.A. Analysis of the directions of urban logistics development and the formation of digital technologies. *Vestnik SamGUPS – Bulletin of SamGUPS*, 2019, no. 2 (44), pp. 39-46 (In Russian).

5. Zhuk A.E. *Cennostno orientirovannoe razvitie logisticheskikh sistem gorodskogo obshhestvennogo passazhirskogo transporta* (Value-oriented development of logistics systems of urban public passenger transport). Doctor's thesis, Saint-Petersburg, St. Petersburg State University of Economics, 2021, 244 p. (In Russian).

6. Mirotin L.B. ed. *Logistika: obshhestvennyj passazhirskij transport^ uchebnik* [Logistics: public passenger transport: textbook]. Moscow, Ekzamen Publ., 2003, 224 p. (In Russian).

7. Guzenko A.V., Val'chuk E.S. Formation of modern urban passenger transport management systems based on logistics principles. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo jekonomicheskogo universiteta (RINH) – Bulletin of the Rostov State University of Economics (RINH)*, 2015, no. 3 (51), pp. 30-35 (In Russian).

8. Rahmatullina A.R. The role of public transport in the development of modern cities. *Vestnik universiteta – Bulletin of the University*, 2014, no. 8, pp. 154-157 (In Russian).

9. Gadzhinskij A.M. *Logistika: uchebnik* [Logistics: textbook]. Moscow, Dashkov i K° Publ., 2012, 484 p. (In Russian).

10. Tregubov V.N. *Funkcional'noe obespechenie sinhronizacii v logisticheskikh sistemah obshhestvennogo passazhirskogo transporta* (Functional synchronization support in logistics systems of public passenger transport). Doctor of Sciences in Economics thesis, Saint-Petersburg, Saratov State Technical University, 2011, 334 p. (In Russian).

11. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation from 31.01.2017, no. NA-19-r «About the approval of the social standard of public transport services in the transportation of passengers and luggage by road and urban ground electric transport» (In Russian).
12. Dryuchin D.A. Organization of the movement of information and financial flows in the system of urban passenger public transport. *Intellekt. Innovacii. Investicii – Intelligence. Innovation. Investments*, 2016, no. 3, pp. 129-134 (In Russian).
13. Boltenko Yu.A. Model of the logistics system of public passenger transport. *Molodoy uchenyj – Young scientist*, 2016, no. 26 (130), pp. 18-20 (In Russian).
14. Nesiolovskaja T.N. Logistic approach to the organization of urban passenger transportation. *Teoreticheskaja jekonomika – Theoretical economics*, 2022, no. 12, pp. 101-110 (In Russian).
15. Mochalin S.M., Kasper M.E. Evaluation of the results of the work of municipal public passenger transport in the city of Omsk. *Vestnik SibADI – The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2018, no. 2 (60), pp. 249-259 (In Russian).
16. Fedorov V.A. [Logistical principles of management as a basis for improving the quality and efficiency of transport services for the population]. *Problemy regional'noj ekonomiki: teoriya i praktika: sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii* [Problems of Regional Economics: Theory and Practice: Proceedings of the International Scientific Conference]. Kirov, 2014, pp. 168-182 (In Russian).
17. Kasper M.E. [Introduction of logistics principles into the practice of urban public passenger transport]. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya molodyh uchenyh: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchyonyh* [Fundamental and applied research of young scientists: materials of the International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Omsk, 2017, pp. 600-604 (In Russian).
18. Boltenko Yu.A. Content and problems of public passenger transport logistics. *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva – Technique and construction technology*, 2016, no. 4 (8), pp. 14-19 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Колебер Юлия Андреевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)».

Мира пр., д. 5, г. Омск, 644080, Российская Федерация.

Преподаватель кафедры «Экономика, логистика и управление качеством», СибАДИ.

Тел.: +7 (906) 918-09-32.

E-mail: uljachabol@mail.ru

Мочалин Сергей Михайлович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)».

Мира пр., д. 5, г. Омск, 644080, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Экономика, логистика и управление качеством», СибАДИ.

Тел.: +7 (962) 058-50-60.

E-mail: mochalin_sm@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Koleber Yulia Andreevna

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI).

5, Mira av., Omsk, 644080, the Russian Federation.

Lecturer of the department of Economics, Logistics and Quality Management, SibADI.

Phone: +7 (906) 918-09-32.

E-mail: uljachabol@mail.ru

Mochalin Sergey Mikhailovich

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI).

5, Mira av., Omsk, 644080, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department of Economics, Logistics and Quality Management, SibADI.

Phone: +7 (962) 058-50-60.

E-mail: mochalin_sm@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Колебер, Ю. А. Логистическая система городского пассажирского транспорта общего пользования / Ю. А. Колебер, С. М. Мочалин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 3 (55). – С. 84 – 94.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Koleber Yu.A., Mochalin S.M. Logistics system of public urban passenger transport. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 3 (55), pp. 84-94 (In Russian).

УДК 620.9:656.2

Д. Б. Рожницкий¹, А. В. Чепиль², А. А. Рыбак¹, А. Н. Галуша³

¹Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»), г. Москва, Российская Федерация;

²Центральная дирекция по тепловодоснабжению – филиал ОАО «РЖД», г. Москва, Российская Федерация;

³Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

О РАЗРАБОТКЕ МЕТОДОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГОСЕРВИСНОГО КОНТРАКТА ДЛЯ СТРУКТУРНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Аннотация. В настоящее время широкое распространение получила практика выполнения энергосервисных контрактов, при которых, например, потребитель топливно-энергетических ресурсов привлекает стороннего исполнителя для реализации энергосберегающих мероприятий и возвращает потом исполнителю заранее оговоренную долю от стоимости сэкономленных ресурсов. Данное решение особенно актуально при дефиците инвестиционных средств у потребителя ресурсов. Так как реализация и соответственно получение эффекта распределена во времени, то сохранить начальные (базовые) условия практически невозможно. Для устранения этой проблемы существует ряд методик, позволяющих сравнивать энергопотребление в сопоставимых условиях. Однако известные методики в основном позволяют проводить сравнение для жилищно-коммунального сектора и не учитывают специфику промышленных потребителей, у которых в период действия контракта в силу производственной необходимости может измениться объем присоединенной нагрузки в ту или иную сторону, а также перепрофилирование использования части зданий или ряда помещений в них, что влечет за собой изменение нормативных и соответственно базовых значений энергопотребления.

В работе рассмотрены основные предпосылки заключения энергосервисного контракта и предложена методика определения эффекта при его реализации для промышленных потребителей, у которых после формирования данных по базовому периоду возникла потребность в корректировке начальных объемов потребления. На основании данной методики выполнены прогнозные расчеты ожидаемого отклонения потребления теплоты от мероприятий по установке качественно-количественного регулирования отпуска теплоты на опытном объекте с учетом изменения объема присоединенной нагрузки относительно базового значения по двум переменным факторам: присоединение к тепловой сети новых потребителей и одновременно перепрофилирование направления использования ряда помещений в одном из зданий, для которых произошло снижение нормативной внутренней температуры. Полученные результаты позволяют корректно сравнивать базовое и фактическое значения потребления теплоты.

Ключевые слова: энергоэффективность, отопление, энергосервисный контракт, теплота, методика.

Dmitriy B. Rozhitsky¹, Alexandr V. Chepil², Aleksey A. Rybak¹, Andrey N. Galusha³

¹Research Institute of railway transport (VNIIZHT), Moscow, the Russian Federation;

²Central Directorate for Heat and Water Supply – branch of JSC «Russian Railways», Moscow, the Russian Federation;

³Russian University of transport (MIIT), Moscow, the Russian Federation

ON THE DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR DETERMINING ENERGY EFFECT DURING APPLICATION OF AN ENERGY SERVICE CONTRACT FOR STRUCTURAL UNITS RAILWAY TRANSPORT

Abstract. Currently, the practice of executing energy service contracts has become widespread, in which, for example, a consumer of fuel and energy resources engages a third-party contractor to implement energy-saving measures

and then returns to the contractor a pre-agreed share of the cost of the saved resources. This decision is especially relevant when there is a shortage of investment funds from the consumer of resources. Since the implementation and, accordingly, the effect is distributed over time, it is almost impossible to preserve the initial (basic) conditions. To eliminate this problem, there are a number of techniques that allow you to compare energy consumption in comparable conditions. However the known methods mainly allow for comparison for the housing and communal sector and do not take into account the specifics of industrial consumers, who may have to change the volume of the attached load in one direction or another during the contract period due to the production need, as well as repurpose the use of a part of buildings or a number of premises in them, which entails a change in regulatory and accordingly, the basic values of energy consumption.

The paper considers the main prerequisites for concluding an energy service contract and suggests a method for determining the effect of its implementation for industrial consumers who, after forming data for the base period had a need to adjust the initial consumption volumes. Based on this methodology, the forecast calculations of the expected deviation of heat consumption from the measures for the installation of qualitative and quantitative regulation of heat release at the experimental facility, taking into account the change in the volume of the attached load relative to the base value for two variable factors: the connection to the heat network of new consumers and at the same time the conversion of the direction of use of a number of premises in one of the buildings for which there was a decrease the standard internal temperature. The results obtained allow us to correctly compare the basic and actual values of heat consumption

Keywords: energy efficiency, heating, energy service contract, heat, methodology.

Задача сдерживания роста цен монополиями всегда стояла и стоит на повестке дня контролирующих органов. Особенно эта актуально в части энергоснабжения как предприятий, так и населения. Поэтому, как правило, при согласовании тарифов на предстоящий период органы регулирования особое внимание уделяют перечню мероприятий, обеспечивающих снижение потребления энергоресурсов и, соответственно, повышения энергетической эффективности как при производстве энергии, так и при ее потреблении. При этом часто для потребителей реализация подобных мероприятий не относится к их профильным видам деятельности и вызывает необходимость привлечения квалифицированных исполнителей, причем на непродолжительное время. Данное обстоятельство и явилось катализатором появления так называемых энергосервисных контрактов. Известно, что одним из пионеров этого направления деятельности, еще в последней четверти прошлого века «предложивших свои услуги в данной сфере, является компания Time Energy, располагавшаяся на юге США в штате Техас, которая подготовила технические решения для автоматизации режимов работы освещения. Было предложено обеспечить установку систем освещения с последующим получением вознаграждения за счет процента достигаемой экономии» [1].

После удачного опыта аналогичные предложения других подрядчиков начали формировать рынок подобных услуг для производителей и потребителей топливно-энергетических ресурсов (ТЭР).

В настоящее время состояние промышленности в России характеризуется высокой энергоемкостью, совокупное потребление ТЭР за 2021 г. составило 826,9 млн т у.т. Наиболее энергоемкими секторами является электроэнергетика, на долю которой приходится 22 %, обрабатывающая промышленность 20 %, тройку лидеров замыкает жилищно-коммунальное хозяйство с объемом 17 % от общего потребления ТЭР [2].

Компания ОАО «РЖД» также относится к значительным потребителям ТЭР, в том числе для обеспечения собственной потребности в тепловой энергии, генерируемой собственными котельными, расходуемой как на нужды отопления (около 80 %), так и для обеспечения технологических потребителей: моечные машины, сушка древесины, приготовление дистиллята и т. п. [3].

Подразделениями железнодорожного транспорта для обеспечения своей деятельности ежегодно расходуется значительное количество ТЭР не только для обеспечения собственно перевозки грузов и пассажиров (тяговые нужды), но и для обеспечения деятельности своей инфраструктуры (нетяговые нужды). Так, в 2021 г. было израсходовано почти 22,7 млн т топлива в условном исчислении, из которых 18,8 % приходится на нетяговую энергетику. Прямые затраты только на приобретение этих ресурсов составили 47,8 млрд р. При этом надо учитывать, что вся эта нетяговая энергетика эксплуатируется в территориально-

распределенной компании и разбита на так называемые локальные энергосистемы (ЛЭ), которые независимо от вида используемого ТЭР в общем случае представляют собой связанную цепочку: производитель (поставщик) ресурсов, транспортная система от производителя к потребителю и, собственно, сами потребители, состоящие преимущественно из зданий и сооружений.

По состоянию на начало 2022 г. подразделениями железнодорожного транспорта эксплуатируется чуть менее 100 тысяч зданий, которые и «потребляют» тепловую энергию и воду.

В связи с тем, что часто эти ЛЭ представляют собой по промышленным меркам объекты малой и сверхмалой энергетики, какая-либо значительная модернизация, например, в части автоматизации, требует значительных инвестиционных вложений и привлечения сторонних профильных подрядчиков, что в целом делает зачастую такую задачу экономически необоснованной.

Одновременно с этим подразделениями компании, ответственными за соответствующий сектор, отмечается повышенный износ основных фондов в части теплоснабжения. Сейчас среднее значение износа оценивается на уровне 75 %. В таблице 1 показана доля износа основных фондов для этого сегмента инфраструктуры по состоянию на 01.01.2020.

Таблица 1 – Доля износа объектов теплоснабжения, %

Показатель	Единица измерения	Доля износа			
		до 30 %	30 – 60 %	60 – 99 %	100 %
Здания котельных	ед.	422	532	384	447
Основное оборудование котельных	ед.	560	840	1 399	1 649
Тепловые сети	км	457,7	584,5	705,6	577

Сравнение приведенных в таблице 1 данных с опубликованными почти 15 лет назад результатами [4] подтверждает, что обновление оборудования проводится, но темпы его оставляют желать лучшего. Это объясняется тем, что инвестиционные средства компании расходуются в первую очередь на модернизацию подвижного состава и путевого хозяйства, а объекты инфраструктуры обеспечиваются во вторую очередь. Поэтому процесс износа этого сегмента отстает от потребных темпов его обновления. Это обстоятельство вызывает необходимость поиска дополнительных решений в части привлечения инвестиционных средств в целях модернизации.

К одному из вариантов решения этой проблемы, несомненно, можно отнести энергосервисные контракты.

Механизм такого контракта состоит в заключении договора по повышению энергетической эффективности между исполнителем работ и заказчиком на их выполнение. По итогам реализации предусмотренных мероприятий исполнитель работ получает плату от объема полученной экономии за счет разницы стоимости от величины сэкономленных энергоресурсов до и после внедрения. Причем плата от достигнутой экономии по условиям договора может быть распределена по времени в определенной пропорции согласно предварительно согласованным условиям.

Исполнитель работ при заключении контракта берет на себя вопрос финансирования мероприятий энергосбережения, а также принимает все экономические риски, связанные с реализацией проекта, в том числе по достижению экономической эффективности. Тем самым, в отличие от традиционного подхода к энергосбережению, где ответственность за предпроектное обследование и определение энергосберегающих мероприятий намеченных проектов ложится на соответствующие подразделения владельца объекта, подход на основе энергосервисного контракта позволяет отнести все риски достижения или недостижения заявленных результатов на исполнителя работ.

Федеральным законом о контрактной системе в сфере закупок услуг [5], Правилами установления достижения энергетической эффективности услуг [6] и требованиями к условиям энергосервисного договора (контракта) [7] установлены ограничительные рамки к энергосервисным контрактам, в том числе в части формирования начальной (максимальной) цены таких работ.

В соответствии с Приказом Министерства энергетики [8] введена в действие методика определения потребления топливно-энергетических ресурсов для мероприятий по повышению энергетической эффективности котельных установок [9], систем теплоснабжения зданий, строений и сооружений, систем внутреннего и наружного освещения, привода электродвигателей насосных, компрессорных и прочих установок.

Стоит отметить тот факт, что энергосервисный контракт предусматривает только плату за сэкономленные энергетические ресурсы, но не учитывает, например, мероприятия по переходу на безлюдные технологии. То есть, например, фактическая экономия от строительства новой котельной за счет энергосервисного контракта выше платы, предусмотренной условиями энергосервиса, ввиду того, что контракт не учитывает оптимизацию штатной численности. Таким образом, для корректного сопоставления экономии, целесообразно в условиях контракта учитывать стоимость всех эксплуатационных затрат до и после реализации энергосервисных мероприятий.

К одному из направлений реализации энергосервисного контракта относится замена оборудования центральных тепловых пунктов с применением качественно-количественного регулирования потребляемой тепловой энергии в зависимости от температуры атмосферного воздуха. Данное техническое решение позволяет исключить необходимость ручного регулирования подачи тепловой энергии на центральном тепловом пункте и с учетом автоматизации процесса регулирования отпуска теплоты потребителю обеспечить экономию ее потребления.

Перед началом реализации энергосервисного договора сторонам необходимо совместно провести обследование объекта и уточнить исходные данные, а именно:

- вид и объем потребления энергоресурса, который планируется экономить;
- задокументированные данные потребления этого ресурса за предыдущие периоды и выбрать один из них как базовый (далее – базовый период), который будет положен в основу для определения объема достигнутой экономии.

В соответствии со стандартом [10] «базовым периодом называется условие о периоде времени до выполнения исполнителем работ (услуг) по энергосервисному договору (должен быть не менее двенадцати последовательных месяцев), в течение которого по показаниям приборов учета определяются объемы потребления коммунальных ресурсов, которые принимаются сторонами за базовые».

Основным оцениваемым параметром, оказывающим влияние на эффективность проекта, выступает размер экономии энергоресурсов, оцениваемой на основе сравнения базового (до реализации проекта) и фактически достигнутого уровня потребления ТЭР. При этом ошибки, допущенные при определении базового уровня энергопотребления (базовой линии) и прогноза фактического потребления, могут стать причиной недополучения энергосервисной компанией запланированных доходов по проекту или фиксации завышенного результата, что ведет к получению необоснованных доходов от мнимой экономии.

В качестве одной из основных причин ошибок при определении экономии выступают изменения в потреблении ресурсов, вызванные действием не учтенных при разработке договора факторов. Таким образом, потребление ТЭР в базовом периоде и в период действия контракта происходит на практике в отличающихся друг от друга условиях, что порождает ошибочное представление о величине экономии энергоресурса. Основным механизмом устранения такого рода ошибок можно назвать приведение базового и фактического потребления к сопоставимым условиям, т. е. проведение процесса верификации измерений, что требует выработки единого методологического подхода.

При разработке и апробации методики определения базового потребления ресурсов и верификации в качестве основного ориентира принимается национальный стандарт [10], а также используются другие нормативные и методические документы РФ в области энергосервиса и энергосбережения, например, [7] и актуальные исследования ученых и участников рынка по данному вопросу [11, 12].

Основная причина ограничений в развитии таких услуг в стационарной теплоэнергетике – отсутствие единой типовой методики, учитывающей возможные разнонаправленные изменения потребления ТЭР (вызванные действием не учтенных при разработке проектов факторов).

К настоящему времени известно несколько решений при определении энергетического эффекта при реализации энергосервисных контрактов. Основные преимущества и недостатки, присущие этим методикам, показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительная таблица методик учета эффекта для энергосервисного контракта

Наименование методики	Область и условия применения	Выявленные недостатки
«Методика расчета значений целевых показателей в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, в том числе в сопоставимых условиях» [13]	Для вычисления снижения потребления электроэнергии	Отсутствует как учет нормативных значений температуры для производственных помещений, обусловленный направлением их использования, так и возможное их перепрофилирование в этой части.
«Методика расчета размера платы по энергосервисному договору, направленному на энергосбережение тепловой энергии» [14]	Для оценки мероприятий в многоквартирных домах. Методика позволяет производить пересчет к сопоставимым условиям при отклонении в отчетном периоде температуры атмосферного воздуха от базовых значений, продолжительность работы системы отопления и изменения площади помещений	Не подходит для производственных зданий, так как не учитывает возможные изменения: – объема помещений; – направления использования помещений
«Методика расчета экономии топливно-энергетических ресурсов в сопоставимых условиях» [15]	Методика позволяет производить пересчет к сопоставимым условиям при отклонении в отчетном периоде температуры атмосферного воздуха от базовых значений	Не позволяет применять для многопрофильных производственных объектов: учитывается в расчетах температура внутри помещений только 18 °С; в расчетах используется площадь, а не объем помещений; в качестве основных факторов расхода ТЭР используется численность персонала; не предусматривает изменения направлений использования помещений

Анализируя функционал перечисленных методик, можно сделать вывод о том, что для определения эффекта на промышленных объектах необходимо разработать методику расчета потребления ТЭР (на примере тепловой энергии) по объектам стационарной теплоэнергетики, которая учитывает факторы изменения объема потребления ресурсов и приводит данные объемы к сопоставимым условиям (учитывает изменения объема потребления теплоты, которые напрямую не связаны с действиями исполнителя работ).

С точки зрения производства и потребления тепловой энергии доля размера экономии в натуральном выражении определяется как разница между объемом потребления заказчиком

тепловой энергии за период до начала реализации перечня энергосберегающих мероприятий, аналогичный расчетному периоду (базовый период), и объемом потребления заказчиком этих ресурсов, определенным после реализации исполнителем работ перечня согласованных энергосберегающих мероприятий, с учетом изменения факторов, оказывающих влияние на объем потребления таких энергоресурсов.

Размер экономии энергетических ресурсов в стоимостном выражении определяется как разница между объемом потребления заказчиком этого ресурса в стоимостном выражении за период до начала реализации перечня мероприятий, аналогичный расчетному периоду, и объемом потребления этого ресурса в стоимостном выражении за расчетный период после реализации исполнителем работ перечня энергосберегающих мероприятий с учетом изменения факторов, также оказывающих влияние на объем потребления таких ресурсов.

Для корректного установления величины эффекта принимаются данные, полученные по показаниям приборов учета, которые нормально эксплуатировались в течение отчетного периода.

После этого данные о фактическом расходе тепловой энергии, затрачиваемой в данном случае на отопление, необходимо привести в сопоставимые условия, т. е. учесть влияние факторов, которые не связаны с деятельностью исполнителя работ по изменению величины расхода ресурсов и поэтому не позволяют напрямую определять конечный результат. Учитываемые факторы в общем случае могут носить разнонаправленный характер, т. е. одни увеличивают расход ресурсов, другие снижают. Все расчеты по сравнению полученных результатов предлагается производить ежемесячно.

На снижение величины потребления ТЭР относятся [16, 17]:

«← вывод потребителей теплоты в течение отчетного периода (уменьшение величины присоединенной нагрузки);

– результаты выполнения мероприятий по внедрению и повышению эффективности использования энергосберегающего технического оборудования и технологий, а также реализацию прочих организационно-технических мероприятий;

– повышение температуры атмосферного воздуха по сравнению с нормативным значением и (или) уменьшение продолжительности отопительного сезона;

– снижение нагрузки теплопотребляющего оборудования вследствие уменьшения объемов работ или характера использования отапливаемого помещения.

К основным факторам, повышающим потребление теплоты, можно отнести:

– ввод в эксплуатацию нового оборудования (потребителя);

– снижение температуры атмосферного воздуха по сравнению с нормативным значением и (или) увеличение продолжительности отопительного сезона;

– увеличение нагрузки теплопотребляющего оборудования вследствие повышения объема работ или характера использования отапливаемого помещения».

В соответствии с Методическими рекомендациями [18] «В целях обеспечения интересов исполнителя в договоре (контракте) указывается на то, что заказчик гарантирует, что в отношении объекта (ов) до даты заключения договора (контракта) обеспечено соблюдение всех установленных санитарно-гигиенических и технических требований по режимам энерго- и ресурсоснабжения, режимам и параметрам работы энергопотребляющих установок, режимов и параметров эксплуатации объекта (ов) и помещений с учетом функционального назначения». Однако когда речь идет о промышленных объектах, на которых реализуются и другие мероприятия, обусловленные как производственной необходимостью, так и независимо от действующего контракта другими энерго- и ресурсосберегающими мероприятиями, в период исполнения договора возможны подобные изменения, что подтверждается также в Постановлении Правительства РФ [19], в котором предусмотрена возможность корректировки используемого для определения размера экономии энергетического ресурса (доли размера экономии) объема потребления энергетического ресурса до реализации исполнителем перечня мероприятий. При этом надо понимать, что

реализация подобных мероприятий не связана со сроками базового периода и последующей работой оборудования, установленного в рамках энергосервисного контракта, т. е. или надо снова определять базовые величины, или в рамках договора корректировать начальные условия.

Для корректировки базового уровня потребления тепловой энергии и приведения к сопоставимым условиям предлагается метод, учитывающий факторы, которые могут повлиять на изменение объемов потребления топливно-энергетических ресурсов и не связанные напрямую с энергосберегающей деятельностью исполнителя работ.

Величину скорректированного базового объема потребления тепловой энергии в i -м отчетном периоде $Q_{\text{баз. от } i}^{\text{кор}}$ определим как сумму или разницу между значениями объема потребления тепловой энергии в соответствующем i -м базовом периоде по показаниям прибора учета или определенном расчетно-измерительным способом в натуральном выражении и теми же значениями, приведенными к сопоставимым условиям:

$$Q_{\text{баз. от } i}^{\text{кор}} = Q_{\text{баз. от } i} \pm Q_{\text{от}}^{\text{с. усл}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{баз. от } i}$ – объем потребления тепловой энергии в соответствующем i -м базовом периоде, Гкал; $Q_{\text{от}}^{\text{с. усл}}$ – потребление тепловой энергии в сопоставимых условиях (при изменении режимов и параметров работы энергопотребляющих установок, режимов и параметров эксплуатации объекта и помещений с учетом функционального назначения), Гкал,

$$Q_{\text{от}}^{\text{с. усл}} = (k_i \cdot Q_{\text{баз. от } i}) \pm Q_{\text{от}}^{\text{доп}}, \quad (2)$$

где k_i – коэффициент влияния изменения температуры атмосферного воздуха или изменения температуры внутри помещения; $Q_{\text{от}}^{\text{доп}}$ – изменение потребления тепловой энергии при вводе (выводе) объемов присоединенной нагрузки, Гкал.

Коэффициент влияния изменения температуры атмосферного воздуха и внутри помещения на потребление ТЭ можно в общем виде рассчитать по формуле:

$$k_i = \frac{t_{\text{вн}}^2 - t_{\text{атм}}^2}{t_{\text{вн}}^1 - t_{\text{атм}}^1}, \quad (3)$$

где $t_{\text{вн}}^1$ – значение температуры внутри помещения в базовом периоде, °С;

$t_{\text{вн}}^2$ – значение температуры внутри помещения отчетного периода (после изменений), °С;

$t_{\text{атм}}^1, t_{\text{атм}}^2$ – значения температуры атмосферного воздуха «до» и «после» по данным местной гидрометеослужбы, °С.

Потребление тепловой энергии при изменении объема присоединенной нагрузки за счет ввода здания или оборудования в эксплуатацию или вывода из нее для любого периода определяют по показаниям прибора учета или расчетно-аналитическим способом, например, для железнодорожных подразделений по Методике планирования расхода топлива на нетяговые нужды и теплоты в ОАО «РЖД» [16] или Справочно-методическому пособию по нормированию топливно-энергетических и водных ресурсов для обеспечения инфраструктуры железнодорожного транспорта [17].

Рассмотрим предложенную методологию на примере подготовки энергосервисного контракта для центрального теплового пункта (ЦТП) на станции Мурманск Октябрьской железной дороги. Регулирование температурного режима на данном объекте в настоящее время производится в ручном режиме, т. е. автоматика отсутствует. Согласно проекту договора предусматриваются покупка, монтаж и обслуживание оборудования на период времени действия договора, а именно – установка автоматического теплового узла в действующем помещении ЦТП с подключением к нему систем отопления потребителей с автоматическим качественно-количественным регулированием подачи теплоты в зависимости от температуры атмосферного воздуха.

При этом предполагается в предстоящей перспективе одновременно с автоматизацией ЦТП увеличить объем присоединенной отопительной нагрузки за счет подключения к системе отопления дополнительно отдельно стоящего здания склада объемом 252 м³ с температурным режимом 12 °С, с одной стороны, и изменение направления использования части административно-бытового корпуса (АБК) общим объемом 3055 м³ в помещение гаража 144 м³ с учетом одновременного нормативного снижения температуры внутри помещения для указанной категории с 18 до 10 °С, с другой стороны, т. е. задача состоит в том, чтобы, не меняя базового значения, определенного до начала действия контракта, определить изменение потребления теплоты, не связанное собственно с погодным регулированием.

Для апробации предлагаемого метода необходимо сначала выполнить расчеты по приведению базовых объемов потребления тепловой энергии в соответствующем *i*-м отчетном периоде к сопоставимым условиям.

С учетом изменения функционального назначения части помещения АБК и снижения в ней нормативной внутренней температуры необходимо определить средневзвешенную температуру отапливаемых помещений внутри всего здания после перепрофилирования его части по формуле:

$$t_{\text{вн. ср}} = t_{\text{вн}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{\text{пом}} \cdot V_{\text{пом}})}{\sum V_{\text{пом}}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{пом}}$ – значение нормативной температуры внутри отапливаемого помещения, °С;
 $V_{\text{пом}}$ – объем отапливаемого помещения.

$$t_{\text{вн. ср}} = t_{\text{вн}}^2 = \frac{(10 \cdot 144) + (2911 \cdot 18)}{3055} = 17,6 \text{ °С.}$$

Следующим этапом рассчитаем коэффициент влияния изменения температуры за весь отопительный период ежемесячно по формуле (2) с учетом того, что $t_{\text{атм}}^1 = t_{\text{атм}}^2$ – по данным метеослужбы в отчетном периоде (значения приведены в таблице 3)

Таблица 3 – Значения среднемесячных температур атмосферного воздуха в отопительный период

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
$t_{\text{атм}} \text{ °С}$	-11,2	-8	-4,2	0,3	5,6	7,6	1,6	-2,9	-7,2

Для примера выполним расчет коэффициента влияния изменения температуры внутри помещения и потребления теплоты с учетом перепрофилирования части помещения АБК за январь:

$$k_{\text{январь}} = \frac{17,6 - (-11,2)}{18 - (-11,2)} = 0,99;$$

$$Q_{\text{от. абк}}^{\text{с. усл}} = k_{\text{январь}} \cdot Q_{\text{баз. от. январь}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{баз. от. январь}}$ – потребление теплоты АБК до изменения функционального назначения части его помещения в январе базового периода (по приборам учета) – 559,5 Гкал.

$$Q_{\text{от. абк}}^{\text{с. усл}} = 0,99 \cdot 559,5 = 551,8 \text{ Гкал.}$$

Аналогично рассчитываем потребление теплоты АБК в базовом отопительном периоде с учетом перепрофилирования части помещений.

Так как во вводимом в эксплуатацию здании склада отсутствует прибор учета, расход теплоты при фактических значениях температуры атмосферного воздуха в базовом периоде определяем по работам [16, 17].

По формуле (1) определяем величину скорректированного базового объема потребления тепловой энергии на объекте энергосервисного контракта. Полученные результаты вычислений приведены в таблице 4.

Таким образом, при допущении, что оба мероприятия (перепрофилирование части здания АБК в гараж и подключение к системе отопления склада) с первого дня начала действия энергосервисного контракта базовое значение энергопотребления изменится с 3339,0 Гкал до 3682,4 Гкал, т. е. последнюю величину следует принимать как базовую при расчете полученного эффекта от реализации основного энергосберегающего мероприятия. При изменении нагрузки в любой другой период нужно произвести соответствующие вычисления с конкретного месяца.

Таблица 4 – Результаты вычислений объемов потребления теплоты при различных вариантах изменения направления использования

Месяц	Количество тепловой энергии, Гкал			
	до реализации исполнителем энергосберегающих мероприятий (базовое)	АБК после перепрофилирования	дополнительное (здание склада)	скорректированное (базовое)
Январь	559,5	551,8	61,8	613,7
Февраль	533,7	525,5	53,4	578,9
Март	527,5	518,0	64,8	582,8
Апрель	353,1	345,1	51,0	396,1
Май	205,8	199,2	21,9	221,0
Июнь	22,7	22,7	–	22,7
Июль	19,4	19,4	–	19,4
Август	22,7	22,7	–	22,7
Сентябрь	54,8	52,7	5,1	57,8
Октябрь	294,7	287,5	39,3	326,8
Ноябрь	324,7	318,5	49,0	367,5
Декабрь	420,4	413,7	54,2	468,0
Итого	3339,0	3276,8	400,6	3682,4

Предложенная методика определения выделения доли эффекта только от проводимых мероприятий в рамках энергосервисного контракта позволяет сформировать научно обоснованную базу при определении финансовых результатов после завершения работ.

Выполненные прогнозные расчеты для конкретного объекта (ЦТП на станции Мурманск) показывают применимость предложенного подхода и позволяют расчетно-аналитическим способом привести отчетный период к базовому при увеличении, с одной стороны, количества и, соответственно, объема отапливаемых помещений и изменении направления использования ряда помещений со снижением нормативной температуры внутри помещений – с другой.

Реализация механизма энергосервисного контракта с применением предложенной к апробации методики позволит обеспечить точное планирование и учет размеров экономии топливно-энергетических ресурсов с учетом сопоставимых условий и расширить механизм выполнения работ по энергосбережению и повышению энергетической эффективности объектов на промышленных предприятиях.

1. Энергосервисная компания. – Текст : электронный // dev.abcdef.wiki : сайт. – URL: https://dev.abcdef.wiki/wiki/Energy_service_company (дата обращения: 14.12.2022).
2. Государственный доклад «О состоянии энергосбережения и повышения энергетической эффективности в Российской Федерации за 2020 год» от 17 февраля 2022 г. – Текст : электронный // – URL . <https://docviewer.yandex.ru> (дата обращения: 14.12.2022).
3. К вопросу об оперативной оценке влияния расхода котельно-печного топлива для котельных железнодорожного транспорта с учетом изменения температуры атмосферного воздуха / Д. Б. Рожицкий, М. С. Филаткин [и др.]. – Текст : непосредственный // Энергосбережение и водоподготовка. – 2017. – № 6. – С. 45–52.
4. Рожицкий, Д. Б. Оценка потенциала топливосбережения на основе мониторинга фактического состояния котельных ОАО «РЖД» / Д. Б. Рожицкий, Ю. Н. Бардыкин. – Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. – 2009. – № 7. – С. 6–10.
5. Федеральный закон «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд» от 5 апреля 2013 г. № 44-ФЗ. – Текст : электронный. – URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/37056> (дата обращения: 14.12.2022).
6. Постановление Правительства РФ «Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности товаров, работ, услуг при осуществлении закупок для обеспечения государственных и муниципальных нужд» от 31 декабря 2009 г. № 122 (ред. от 6 декабря 2022 г.). – Текст : электронный. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_96786/1ada11354e56ca22d1f5466a47382232b2c7641c/ (дата обращения: 20.02.2023).
7. Постановление Правительства РФ «О требованиях к условиям энергосервисного договора (контракта) и об особенностях определения начальной (максимальной) цены энергосервисного договора (контракта) (цены лота)» от 18 августа 2010 г. № 636 (с изменениями и дополнениями). – Текст : электронный. – URL: <https://base.garant.ru/12178093/> (дата обращения: 14.12.2022).
8. Приказ Министерства энергетики РФ «Об утверждении методики определения расчетно-измерительным способом объема потребления энергетического ресурса в натуральном выражении для реализации мероприятий, направленных на энергосбережение и повышение энергетической эффективности» от 4 февраля 2016 г. № 67. – Текст : электронный. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71263500/> (дата обращения: 14.12.2022).
9. Минаев, Б. Н. К вопросу оценки потенциала топливо-энергосбережения при эксплуатации водогрейных газовых котельных агрегатов на природном газе / Б. Н. Минаев, А. В. Костин, С. А. Волков. – Текст : непосредственный // Энергосбережение и водоподготовка. – 2022. – № 1 (135). – С. 11–15.
10. ГОСТ Р 56743–2015. Измерение и верификация энергетической эффективности. Общие положения по определению экономии энергетических ресурсов. – Текст : электронный. – URL https://gbuce.ru/images/energосervice/zhil_sektor/13___56743-2015.pdf (дата обращения: 20.12.2022).
11. Методические рекомендации по расчету эффектов от реализации мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности. – Текст : электронный. – URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/11291/> (дата обращения: 14.12.2022).
12. Комяков, А. А. О подходах к оценке фактической экономии энергетических ресурсов, достигаемой при реализации энергосервисных договоров // А. А. Комяков, М. М. Никифоров, В. В. Эрбес. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2014. – № 2 (18). – С. 106–114.
13. Методика расчета значений целевых показателей в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, в том числе в сопоставимых условиях, утвержденная приказом Министерства регионального развития Российской Федерации от 7

июня 2010 г. № 273. – Текст : электронный. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=230563//> (дата обращения: 20.12.2022).

14. Методика расчета размера платы по энергосервисному договору, направленному на энергосбережение тепловой энергии, разработанная аналитическим центром при правительстве Российской Федерации. – Текст : электронный. – URL: <https://energo.mos.ru/activities/energoserwis/mkd/B4.docx> (дата обращения: 14.12.2022).

15. Методика расчета экономии энергетических ресурсов в сопоставимых условиях, разработанная саморегулируемой организацией «Некоммерческое партнерство «Межрегиональное объединение по развитию энергосервисного рынка и повышению энергоэффективности» (НП «ЭСМО»). – Текст : электронный. – URL: http://www.np-esmo.ru/pdf/esko_mun.pdf (дата обращения: 05.11.2022).

16. Методика планирования расхода топлива на нетяговые нужды и теплоты в ОАО «РЖД»: утв. ОАО «РЖД» 21.08.2022 № 2230р. – Текст : электронный. – URL: <http://esps.rzd/cons/cgi/online>. (дата обращения: 14.12.2022).

17. Рожицкий, Д. Б. Справочно-методическое пособие по нормированию топливно-энергетических и водных ресурсов для обеспечения инфраструктуры железнодорожного транспорта / Д. Б. Рожицкий, Ю. Н. Бардыкин, А. А. Рыбак. – Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 472 с. – Текст : непосредственный.

18. Методические рекомендации для государственных и муниципальных заказчиков, бюджетных и автономных учреждений по вопросу подготовки энергосервисных договоров (контрактов). – Москва : Министерство экономического развития (письмо от 6 июля 2017 года № 15627-НП/Д07и). – Текст : электронный. – URL https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_219743/8b174230741653df58c426e411e93af989194790: (дата обращения: 05.11.2022).

19. Постановление Правительства РФ от 31.05.2023 № 890 «О внесении изменений в Постановление Правительства Российской Федерации от 18 августа 2010 г. № 636». – Текст : электронный. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202306010069> (дата обращения: 05.11.2022).

References

1. *Energoservisnaia kompaniia* [Energy service company]. Available at: https://dev.abcdef.wiki/wiki/Energy_service_company (accessed 14.12.2022).

2. State Report «On the state of energy conservation and energy efficiency improvement in the Russian Federation for 2020» dated February 17, 2022. Available at: <https://docviewer.yandex.ru> (accessed 14.12.2022). (In Russian).

3. Rozhitsky D.B., Filatkin M.S. et al. On the issue of operational assessment of the impact of the consumption of boiler-furnace fuel for boiler houses of railway transport, taking into account changes in atmospheric air temperature. *Energoberezhnie i vodopodgotovka – Energy saving and water treatment*, 2017, no. 6, pp. 45-52 (In Russian).

4. Rozhitsky D.B., Bardykin Yu.N. Assessment of the fuel saving potential based on monitoring the actual condition of the boiler houses of JSC «Russian Railways». *Promyshlennaiia energetika – Industrial power engineering*, 2009, no. 7, pp. 6-10 (In Russian).

5. Federal Law No. 44-FZ of April 5, 2013 «On the Contract System in the Field of Procurement of Goods, Works, and Services for State and Municipal Needs». Available at: <http://kremlin.ru/acts/bank/37056> (accessed 14.12.2022). (In Russian).

6. Resolution of the Government of the Russian Federation «On Approval of the Rules for Establishing Energy Efficiency Requirements for Goods, Works, services in Procurement for State and Municipal Needs» dated December 31, 2009 no. 122 (ed. dated December 6, 2022). Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_law_96786/1ada11354e56ca22_d1f5466a47382232b2c7641c/ (accessed 20.02.2023).

7. Resolution of the Government of the Russian Federation «On requirements to the terms of the Energy service Agreement (Contract) and on the specifics of determining the initial (maximum) price

of the energy service agreement (contract) (lot price)» dated August 18, 2010 no. 636 (with amendments and additions). Available at: <https://base.garant.ru/12178093/> (accessed 14.12.2022) (In Russian).

8. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation «On approval of the methodology for determining by calculation and measurement the volume of energy resource consumption in kind for the implementation of measures aimed at energy conservation and energy efficiency improvement» dated February 4, 2016 no. 67. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71263500/> (accessed 14.12.2022) (In Russian).

9. Minaev B.N., Kostin A.V., Volkov S.A. On the issue of assessing the potential of fuel-energy saving in the operation of hot-water gas boiler units on natural gas. *Energosberezhenie i vodopodgotovka – Energy saving and water treatment*, 2022, no. 1 (135), pp. 11-15 (In Russian).

10. National Standard 56743–2015. Measurement and verification of energy efficiency. General provisions on the definition of saving energy resources. Available at: https://gbuce.ru/images/energосervice/zhil_sektor/13___56743-2015.pdf (accessed 20.12.2022).

11. Methodological recommendations for calculating the effects of the implementation of energy saving and energy efficiency measures. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/11291/> (accessed 14.12.2022) (In Russian).

12. Komyakov A.A., Nikiforov M.M., Erbes V.V. On approaches to assessing the actual savings of energy resources achieved during the implementation of energy service contracts. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 2 (18), pp.106-114 (In Russian).

13. Methodology for calculating the values of target indicators in the field of energy saving and energy efficiency improvement, including in comparable conditions, approved by Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation no. 273 dated June 7, 2010. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=230563/> (accessed 20.12.2022) (In Russian).

14. Methodology for calculating the amount of payment under an energy service agreement aimed at energy saving of thermal energy, developed by the analytical center under the Government of the Russian Federation. Available at: <https://energo.mos.ru/activities/energосervis/mkd/B4.docx> (accessed 14.12.2022) (In Russian).

15. The methodology for calculating the savings of energy resources in comparable conditions, developed by the self-regulatory organization «Non-profit Partnership «Interregional Association for the Development of the Energy service market and energy efficiency Improvement» (NP «ESMO»)). Available at: http://www.np-esmo.ru/pdf/esko_mun.pdf (accessed 05.11.2022).

16. Methodology for planning fuel consumption for non-traction needs and heat in JSC «Russian Railways»: approved JSC «Russian Railways» 21.08 2022 № 2230r. Available at: <http://esps.rzd/cons/cgi/online> (accessed 14.12.2022).

17. Rozhitsky D.B., Bardykin Yu.N., Rybak A.A. *Spravochno-metodicheskoe posobie po normirovaniu toplivno-energeticheskikh i vodnykh resursov dlia obespecheniia infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta* [Reference manual on rationing of fuel, energy and water resources to ensure the infrastructure of railway transport]. Moscow; Vologda, Infra-Engineering Publ., 2023, 472 p. (In Russian).

18. Methodological recommendations for state and municipal customers, budgetary and autonomous institutions on the preparation of energy service agreements (contracts). Ministry of Economic Development (Letter No. 15627-NP/D07i dated July 6, 2017). Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_docLAW_219743/8b174230741653df58c426e411e93af989194790/ (accessed 05.11.2022) (In Russian).

19. Resolution of the Government of the Russian Federation of 31.05.2023 no. 890 «On Amendments to the Resolution of the Government of the Russian Federation of August 18, 2010 no. 636». Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202306010069> (accessed 05.11.2022) (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рожицкий Дмитрий Борисович

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»).

3-я Мытищинская ул., д. 10, г. Москва, 129626, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, начальник отдела ЦНК.

Тел.: +7 (906) 788-01-18.

E-mail: rodim@yandex.ru

Чепиль Александр Валерьевич

Центральная Дирекция по тепловодоснабжению – филиал ОАО «РЖД».

Каланчевская ул., д. 15 а, г. Москва, 127078, Российская Федерация.

Магистр, заместитель начальника отдела.

Тел.: +7 (499) 260-73-80.

E-mail: chepilav@cdiv-rzd.ru

Рыбак Алексей Андреевич

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»).

3-я Мытищинская ул., д. 10, г. Москва, 129626, Российская Федерация.

Магистр, руководитель проектов ЦНК.

Тел.: +7 (495) 602-80-93.

E-mail: Rybak.Aleksey@vniizht.ru

Галуша Андрей Николаевич

Российский университет транспорта (МИИТ).

Часовая ул., д. 22/2, г. Москва, 125190, Российская Федерация.

Кандидат наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика и водоснабжение на транспорте».

Тел.: +7 (916) 058-49-46.

E-mail: galusha@abok.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

О разработке методологии определения энергетического эффекта при реализации энергосервисного контракта для структурных подразделений железнодорожного транспорта / Д. Б. Рожицкий, А. В. Чепиль, А. А. Рыбак, А. Н. Галуша. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 3 (55). – С. 94 – 106.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rozhitsky Dmitry Borisovich

Research Institute of Railway Transport (JSC «VNIIZHT»).

10, 3rd Mytischinskaya st., Moscow, 129626, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, docent, head of the department of the Central Committee.

Phone: +7 (906) 788-01-18.

E-mail: rodim@yandex.ru

Chepil Alexander Valerievich

The Central Directorate for Heat and Water Supply – a branch of JSC «Russian Railways».

15a, Kalanchevskaya st., Moscow, 127078, the Russian Federation.

Master, deputy head of the department.

Phone: +7 (499) 260-73-80.

E-mail: chepilav@cdiv-rzd.ru

Rybak Alexey Andreevich

Research Institute of Railway Transport (JSC «VNIIZHT»).

10, 3rd Mytischinskaya st., Moscow, 129626, the Russian Federation.

Master's degree, project manager of the central research center

Phone: +7 (495) 602-80-93.

E-mail: Rybak.Aleksey@vniizht.ru

Galusha Andrey Nikolaevich

Russian University of Transport (MIIT).

22/2, Chasovaya st., Moscow, 125190, the Russian Federation.

Ph. D., associate professor of the department of Heat and Power Engineering and Water Supply in Transport.

Phone: +7 (916) 058-49-46.

E-mail: galusha@abok.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Rozhitsky D.B., Chepil A.V., Rybak A.A., Galusha A.N. On the development of a methodology for determining energy effect during application of an energy service contract for structural units railway transport. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 3 (55), pp. 94-106 (In Russian).

УДК 621.311.4

Т. В. Мятеж, В. Я. Любченко, Е. А. Могиленко

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), г. Новосибирск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНВЕРТОРНОГО РЕЖИМА ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ ПОДСТАНЦИИ ТЕАТРАЛЬНАЯ НОВОСИБИРСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Аннотация. В последнее время воздействие технологий на окружающую среду стало сопоставимо по своим масштабам с воздействием природных явлений, поэтому особую актуальность принимают вопросы

повышения экологичности технологических производств и вопросы энергосбережения. Особая роль в решении названных вопросов отводится электрическому транспорту как наиболее экологичному. Рынок электромобилей и зарядных станций развивается динамично: темпы прироста – до 80 % ежегодно. К 2030 г. количество электромобилей достигнет 1,5 млн единиц. Подписано распоряжение, согласно которому выделено около 1,37 млрд руб. на создание зарядной инфраструктуры для электротранспорта в России. Так, при организации и разработке систем электроснабжения более правильным решением является применение инверторно-аккумуляторной резервной системы электроснабжения. Такая система обеспечит надежную и бесперебойную работу потребителей в здании. Более того, при переходе к рыночной модели электроэнергетики, основанной на заключении двухсторонних договоров, производитель и потребитель могут меняться местами, т. е. потребитель, у которого образуется излишек электроэнергии, может продавать ее в сеть. Поэтому в статье рассмотрено решение задачи проектирования инверторного режима системы электроснабжения для подключения зарядной станции электромобилей к подстанции города Новосибирска. Подключенное зарядное устройство электромобиля, являясь нелинейной нагрузкой, приводит не только к увеличению нагрузки на электросетевую инфраструктуру, но может быть и источником электроснабжения. При этом данные потребители получают льготы на оплату электроэнергии при дальнейшей зарядки своего устройства. Было выполнено имитационное моделирование зарядной станции с использованием программного пакета MATLAB Simulink и проведено технико-экономическое обоснование ее работы.

Ключевые слова: инверторный режим, инвертор, ведомый сетью, энергосбережение, зарядная станция, электромобиль, эколого-экономический критерий, литий-титанатный аккумулятор, время заряда, ресурс батареи, температурный режим.

Tatiana V. Myatezh, Valentina Ya. Lyubchenko, Egor A. Mogilenko

Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, the Russian Federation

STUDY OF THE CHARGING STATION INVERTER MODES FOR ELECTRIC VEHICLES ON THE EXAMPLE OF THE NOVOSIBIRSK ENERGY SYSTEM TEATRANALNAYA SUBSTATION

Abstract. Recently, the impact of technologies on the environment has become comparable in scale to natural phenomena, therefore, the issues of improving the environmental friendliness of technological production and energy saving issues are of particular relevance. A special role in solving this issue is given to electric transport as the most environmentally friendly. The market for electric vehicles and charging stations is developing dynamically: the growth rate is up to 80 % annually. By 2030, the number of electric vehicles will reach 1.5 million units. An order was signed that allocated about 1.37 billion rubles for the creation of a charging infrastructure for electric transport in Russia. Therefore, when organizing and designing power supply systems, a more correct solution is to use an inverter-battery backup power supply system. Such a system will ensure reliable and uninterrupted operation of consumers in the building. Moreover, during the transition to a market model of the electric power industry based on the conclusion of bilateral agreements, the producer and consumer can change places, i.e. a consumer who has a surplus of electricity can sell it to the network. The paper considers the solution of the problem of designing the inverter mode of the power supply system for connecting the charging station of the electric car to the substation of the city of Novosibirsk. The connected electric car charger, being a non-linear load, leads not only to an increase in the load on the power grid infrastructure, but can also be a source of power supply. They can also cause deterioration in power quality by generating harmonic distortion. Therefore, special attention is paid to the effect of the inverter mode of electric vehicle charging stations on the quality of power supply to the consumer in the power system. Simulation modeling of the charging station was performed using the MATLAB Simulink software package and a feasibility study of its operation was carried out.

Keywords: inverter mode, grid-driven inverter, energy saving, charging station, electric car, environmental and economic criteria, lithium-titanate battery, charge time, battery life, temperature conditions.

Одним из действенных инструментов предотвращения потепления климата на Земле является широкомасштабное внедрение электромобилей, особенно в условиях мегаполиса. В среднем от электромобилей в два раза меньше выбросов CO₂, чем от автомобилей с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Кроме этого следует отметить в качестве одного из важных стимулов внедрения электротранспорта поддержку промышленной политики, в том числе политики инновационного развития страны.

Рынок электромобилей и зарядных станций развивается динамично: темпы прироста – до 80 % ежегодно. К концу первого квартала 2021 г. в России было зарегистрировано 12,4 тыс.

электромобилей. В 2025 г. ожидается увеличение продаж электромашин до объема 100 тыс. единиц. К 2030 г. количество электромобилей достигнет 1,5 млн единиц [1].

Основными барьерами для развития электромобилей в России являются их высокая стоимость и неразвитость сети заправочных станций. Актуальность проблемы подтверждается тем, что в марте 2022 г. премьер-министр Михаил Мишустин подписал распоряжение, которым выделил около 1,37 млрд руб. на создание зарядной инфраструктуры для электротранспорта в России.

Следует отметить, что масштабный переход на использование электромобилей будет способствовать росту электропотребления. Кроме того, для снабжения энергией электромобилей необходимо создание соответствующей зарядной инфраструктуры с применением инверторного режима. Все это, в свою очередь, потребует ввода дополнительных энергетических мощностей и возможного изменения характера графика электрической нагрузки. Поэтому актуальными становятся вопросы организации инверторного режима зарядных станций электромобилей.

Современные тенденции показывают, что с повышением количества бюджетного предложения по электромобилям нужно конкурентно развивать публичную зарядную инфраструктуру – около торговых и бизнес-центров и жилых комплексов.

Повысить окупаемость зарядных станций позволяют умные сервисы, в первую очередь снижающие стоимость технологического присоединения через динамическое распределение мощности между основным объектом и зарядной станцией, объединение с системами smartgrid и с региональными энергосистемами за счет организации инверторного режима для сети зарядных станций. Перспективной представляется технология V2G (Vehicle-to-Grid), позволяющая подключать автомобиль в общую энергосеть для своевременной подзарядки автомобиля или возвращения лишней электроэнергии обратно [1].

Наиболее перспективным вариантом построения автономных систем представляются зарядные станции электромобилей с применением инверторного режима, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с ветровыми, ветродизельными и ветро-, фотодизельными энергетическими установками, которым присущ стохастический характер выработки электроэнергии, что является их существенным недостатком. В штатном режиме работы, при малой потребляемой мощности блок аккумуляторных батарей заряжается, чтобы в будущем при возникновении каких-либо аварийных ситуаций отдать накопленный заряд и поддержать работу энергетической установки до момента включения дизель-генератора.

При переходе к рыночной модели электроэнергетики, основанной на заключении двухсторонних договоров, производитель и потребитель могут меняться местами, т. е. потребитель, у которого образуется излишек электроэнергии, может продавать ее в сеть. Это в свою очередь позволит решить проблему энергодефицитности отдельных регионов нашей страны, т. е. «расшить» «узкие места» в электроснабжении. Технически этот вопрос может быть реализован с использованием схемы инверторного режима (Правила устройства электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 2013).

Более того, перспектива применения инверторного режима позволяет решить ряд эколого-социальных задач, а также проблему энергосбережения.

Различают три основных класса систем непрерывного электроснабжения (СНЭС).

1. Система «on-line». Это система, в которой инвертор работает постоянно. В нормальном режиме – от выпрямленной сети переменного тока, а в аварийном – от аккумуляторной батареи.

2. Источники резервированного питания «off-line». Инвертор включается при отклонениях напряжения сети за допустимые пределы или полном его отсутствии.

3. Гибридные, в которых обычные системы «on-line» дополняются устройствами, ограничивающими импульсные перенапряжения в сети переменного тока (Правила устройства электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 2013).

В данной статье реализована задача проектирования и организации инверторного режима

зарядной станции, учитываемой как нагрузка системы электроснабжения (СЭС). Также учитывается ее влияние на качество электроэнергии в сети. В качестве объекта исследования выбрана подстанция Театральная города Новосибирска.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

проанализировать принципы работы зарядных станций электромобилей и основы организации их инверторного режима;

выполнить анализ основных видов зарядных станций: зарядных станций для заряда грузового транспорта, электробусов, автомобилей, а также их местоположения: для мегаполисов, на протяженных трассах за городом, для частного пользования (собственная), с точки зрения максимизации ресурса, и улучшения эксплуатационных показателей транспортного средства (ТС);

спроектировать схему электроснабжения для организации инверторного режима и подключения зарядных станций электромобилей;

провести анализ высших гармоник при ведении инверторного режима работы зарядной станции в пакете MATLAB Simulink на предмет качества электроснабжения.

В статье реализовано реверсирование работы инвертора для обеспечения возможности передачи электроэнергии от сети переменного тока к сети постоянного тока и обратно. Реверсирование позволяет постоянно поддерживать аккумуляторную батарею в работоспособном состоянии, одновременно обеспечивая возврат энергии в сеть переменного тока. Помимо этого достигается высокая безотказность электропитания ответственных потребителей на объектах различного назначения [2].

Организация инверторного режима зарядных станций для электромобилей. В настоящее время воздействие технологий на окружающую среду стало сопоставимо по своим масштабам с воздействием природных процессов. Поэтому для поддержания нормального экологического фона в мире требуется разработка технологий, дружественных по отношению к окружающей среде. Имеются существенные достижения по исследуемому вопросу как в отечественной, так и в зарубежной практике [1].

В данной статье это реализуется на примере организации инверторного режима для функционирования зарядных станций электромобилей.

Часто требуется настолько глубокое регулирование управляемых выпрямителей, что они переходят в качественно новый режим работы, характеризующийся встречным направлением тока относительно преобразованной ЭДС. Такой режим работы называется инверторным. В более широком смысле инвертор в преобразовательной технике – это устройство для преобразования постоянного тока в переменный [3].

Инверторный режим управляемого выпрямителя возможен только в тех преобразователях, у которых в цепи нагрузки имеется либо источник ЭДС, либо индуктивность, либо то и другое.

При угле управления вентилем α более 90° среднее значение выпрямленного напряжения меняет знак и выпрямитель переходит в инверторный режим. В этом режиме большую часть работы вентиля его ток направлен против фазной ЭДС, и активная мощность из цепи нагрузки передается в анодные цепи преобразователя, т. е. в источник переменного тока.

Процесс инвертирования представляет собой преобразование постоянного тока, протекающего в нагрузке преобразователя, в переменный ток, протекающий в анодных цепях преобразователя [4].

По сравнению с традиционной схемой электроснабжения, которая предусматривает четкую градацию «производитель – потребитель», организация инверторного режима позволяет, позволяет реализовать следующее.

1. Выравнивание нагрузок, т. е. обеспечение бесперебойного питания в случае потери напряжения от источника электроснабжения.

2. Обеспечивает более гибкое тарифообразование по сравнению с традиционной, сложившейся в регионах схеме установления цен на электроэнергию.

3. Улучшает экологическую обстановку в регионах, снимает социальную напряженность.
4. Способствует решению задач энергосбережения.

Можно привести примеры нескольких наиболее типичных устройств зарядной станции: устройство бесперебойного электропитания многоканальное стабилизирующее МПК 8 Н02J 7/34, зарядно-разрядный преобразователь ЗРП-150/50, двухкаскадный преобразователь напряжения с интеллектуальной защитой от режимов перегрузки и токов коротких замыканий и т. д.

Устройство бесперебойного электропитания многоканальное стабилизирующее, МПК 8 Н02J 7/34. Известно устройство бесперебойного электропитания (Патент РФ №2221320 (фамилии патентообладателей: Никитин И. Е., Бушуев В. М.).

Описываемое устройство содержит сетевой выпрямитель, выводами переменного тока подключенный к промышленной сети электроснабжения переменного тока, а выводами постоянного тока – к входным выводам зарядно-буферного преобразователя (ЗБП). Выходные выводы постоянного тока подключены к резервной аккумуляторной батарее и входам преобразователей напряжения (ПН) постоянного тока в постоянный.

ЗБП и ПН выполнены по схеме высокочастотного преобразования и состоят из инвертора, узла управления с ШИМ-регулятором и трансформаторно-выпрямительного узла (ТВУ), первичная обмотка трансформатора которого подключена к выводам переменного тока инвертора, а выходы постоянного тока ТВУ образуют выходные выводы устройства.

Недостатком данного устройства бесперебойного электропитания является то, что в нем не обеспечена возможность рекуперации энергии аккумуляторной батареи в питающую промышленную сеть переменного тока.

Зарядно-разрядный преобразователь ЗРП-150/50. Известен зарядно-разрядный преобразователь ЗРП-150/50, поставляемый обществом с ограниченной ответственностью «Элмашпром», представляющий собой трехфазный тиристорный реверсивный преобразователь, предназначенный для заряда, тренировочного заряда, формования в режиме автоматического оптимального заряд-разряда аккумуляторных батарей.

В режиме разряда энергия, вырабатываемая аккумуляторными батареями, инвертируется в трехфазную питающую сеть 50 Гц, 380 / 220 В.

Недостатком данного зарядно-разрядного преобразователя является то, что переключение режимов работы преобразователя (заряд, тренировочный заряд, формование аккумуляторных батарей в режиме автоматического заряд-разряда) производится вручную, что не позволяет обеспечить бесперебойность электропитания (при аварийном отключении питающей сети).

Двухкаскадный преобразователь напряжения с интеллектуальной защитой от режимов перегрузки и токов коротких замыканий. Известен двухкаскадный преобразователь напряжения (Патент РФ № 2314621 на изобретение «Двухкаскадный преобразователь напряжения с интеллектуальной защитой от режимов перегрузки и токов коротких замыканий», МПК К 8 Н02J 9/06).

Двухкаскадный преобразователь напряжения состоит: из первого канала преобразования напряжения основной сети напряжения постоянного тока с аккумуляторной батареей и из второго канала преобразования напряжения резервной сети напряжения постоянного тока с аккумуляторной батареей.

Главный недостаток данного устройства двухкаскадного преобразователя напряжения состоит в том, что он не является реверсивным, так как в нем не обеспечена возможность передачи электроэнергии в питающую сеть постоянного тока и соответственно возможность заряда аккумуляторной батареи, подключенной к этой сети.

Особенностью предложенного в статье подхода является наличие двунаправленного автономного инвертора напряжения. Данное устройство предназначено для преобразования постоянного тока в переменный с протеканием энергии в одном из двух указанных направлений в соответствии с внутренним управляющим сигналом: от звена постоянного тока

(АКБ) к звену переменного тока (разряд / генерация) и от звена переменного тока к звену постоянного тока [5, 6].

Применение трехфазных автономных инверторов напряжения (АИНов) в современных условиях. Как известно, трехфазные транзисторные инверторы применяются на практике для создания трехфазных сетей переменного тока на автономных объектах и для управления электродвигателями переменного тока. Из многообразия схемных решений трехфазных инверторов практическое применение находит лишь одна схема – мостовая, представленная на рисунке 1. Здесь нагрузка соединена в звезду и подключена прямо к выходным зажимам А, В и С инвертора без трансформатора. Нагрузка может соединяться и в треугольник, а для согласования уровней напряжений инвертора и нагрузки могут использоваться три однофазных трансформатора либо один трехфазный, как и в обычных трехфазных системах переменного напряжения.

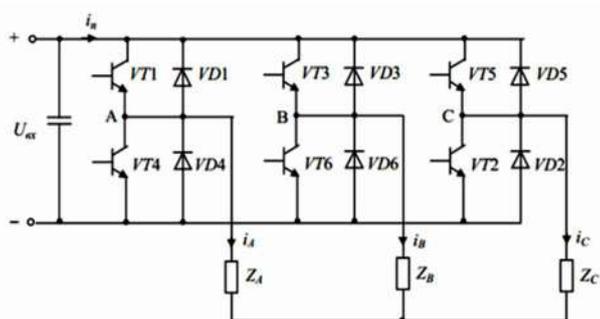


Рисунок 1 – Трехфазный мостовой инвертор напряжения

Электромагнитные процессы и характеристики инвертора определяются следующими факторами:

- 1) схемой соединения нагрузки – в звезду или в треугольник;
- 2) способом управления современными управляемыми полупроводниками – 180-градусное или 120-градусное управление;
- 3) характером нагрузки, который определяется коэффициентом

$$K = \frac{R_H}{\omega} \cdot L_H \quad (1)$$

При 180-градусном управлении каждый из современных управляемых полупроводников находится в открытом состоянии 180 °, пары транзисторов, образующих вертикальные стойки, как и в однофазных двухтактных схемах, работают в противофазе, управление вертикальными стойками современных управляемых полупроводников осуществляется со сдвигом на 120 ° [7].

При проектировании зарядных станций электромобилей необходимо учесть ряд требований согласно стандартам и ГОСТам, таким как EN-61851-1 и IEC 62196. Допустимые режимы зарядки описаны в разделе 1 стандарта IEC 62196, который определяет основные варианты [8]. Одним из основных стандартов для зарядных станций является IEC 61851-1–2013, определяющий общие требования как к сети, так и к преобразователям, входящим в состав зарядных станций. Классификация зарядных устройств согласно регламентным документам, а именно ряду стандартов ГОСТ МЭК, IER, SAE, приведена в таблице 1.

В настоящее время цифровое общение реализовано только на зарядках третьего уровня. Интерфейс между зарядкой и авто работает примерно так: электромобиль говорит «я готов заряжаться, мне нужно 15 ампер», а зарядка определяет максимальное количество тока, которое авто может потребить. Тот же стандарт ISO15118 идет с функцией plug-in-charge, благодаря которой автомобиль сам авторизуется в системе, т. е. пользователю не обязательно проводить карточкой по зарядке, чтобы войти в свой аккаунт и получать электроэнергию.

Сейчас самая сложная коммуникация реализована на уровне «зарядка – сервер», а не между авто и зарядкой [9].

Таблица 1 – Классификация зарядных устройств электромобилей

Уровни напряжения	Расположение и конфигурация ЗУ	Мощность, кВт	Время заряда, ч	Запас энергии (кВт · ч)	Тип коннектора
Уровень 1 120 В (США) 230 В (ЕС)	Бортовое однофазное	< 3,7	11 – 36	16 – 50	SAE J1772 IEC 62196-2 Type 1
Уровень 2 240 В (США) 380 В (ЕС)	Бортовое однофазное или трехфазное	3,7 – 22	1 – 6	16 – 80	IEC 62196-2 Type 2 CHAdeMO
Уровень 3 240-600 В (США) 380-600 В (ЕС)	Стационарное постоянного тока	> 50 < 240	0,1 – 1	20 – 100	IEC 62196-2 «Hybrid» SAE J1772 «Hybrid» CHAdeMO

Что касается стандартов в этой теме, то можно отметить, что универсальные стандарты задействованы пока не везде, их продолжают внедрять, и они продолжают меняться, так как рынок еще достаточно сырой, и не все стабилизировалось. Невозможно создать один общий стандарт. Есть определенные стандарты, которые решают определенные задачи. Например, есть стандарт OpenADR, который позволяет удаленно управлять электроэнергией подключенных электроустройств – он балансирует всплески потребления электроэнергии, и зарядки в него отлично вписываются. Указанный стандарт является частью умного города, но решает конкретную задачу. И таких специализированных стандартов будет достаточно много [10].

Необходимо отметить, что массовое применение электромобилей и организация инверторного режима позволит осуществить следующее:

- существенно повысить эффективность применения и проектирования электрических распределительных сетей за счет управляемой распределенной нагрузки;

- увеличить полезный отпуск электроэнергии в сеть за счет организации инверторного режима;

- обеспечить выравнивание «провала» в ночное время суток профиля нагрузок энергосистемы;

- при внедрении новейших технологий V2G рассматривать электромобили как распределенные накопители электроэнергии для покрытия пиковых нагрузок энергосистемы;

- существенно повысить эффективность применения электрических распределительных сетей и увеличить полезный отпуск электроэнергии;

- снизить выбросы вредных веществ в атмосферу, что улучшит экологическую обстановку в мире.

Причем поскольку основные генерирующие источники энергии и прочие производства находятся в черте крупных мегаполисов, то наиболее актуальным направлением развития зарядных станций являются именно мегаполисы.

Схемные решения системы электропитания на базе трехфазного АИН. Рассмотрим структурную схему устройства электромобиля, которая представлена на рисунке 2.

Зарядное устройство преобразует переменное напряжение внешней сети в постоянное для заряда аккумуляторных батарей, тяговой и вспомогательной.

Устройство защиты (блок реле и предохранителей) состоит из выключателей, реле, предохранителей, которые включены между аккумуляторной батареей и остальной электрической схемой – потребителями. При возникновении неисправности цепь переменного тока и аккумуляторы отключаются.

Тяговая аккумуляторная батарея обеспечивает энергией двигатель электромобиля. В настоящее время наиболее популярными являются калиевые, натриевые и титанатные аккумуляторные батареи [11].

Бортовой компьютер контролирует состояние основных функциональных компонентов и бортовых систем электромобиля, при необходимости инициирует средства защиты.

Дополнительный источник электроэнергии (обычно вспомогательная аккумуляторная батарея на 12 В) обеспечивает работу осветительных приборов, панели приборов, стеклоподъемников, стеклоочистителей и т. д.

Электронный контроллер электродвигателя формирует требуемый вид напряжения питания, управляет числом оборотов и тяговым моментом на валу по командам водителя или автоматически.

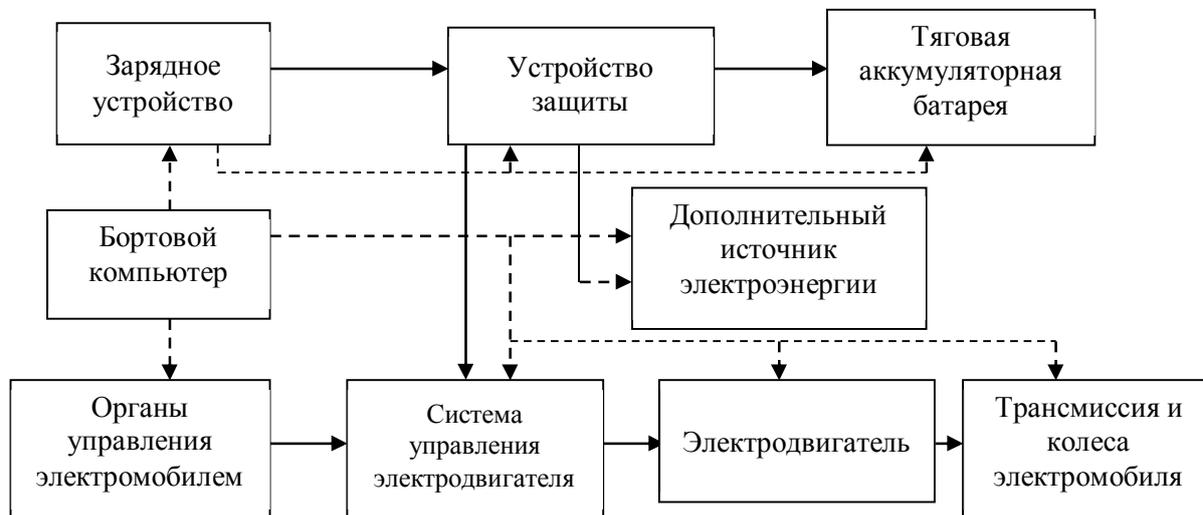


Рисунок 2 – Блок-схема устройства электромобиля

Заряд основной батареи осуществляется от зарядного устройства, располагаемого на борту электромобиля или вне его. Задача данного устройства состоит в том, чтобы обеспечить необходимый ток в кратчайший период времени с соблюдением алгоритма заряда аккумуляторной батареи, рекомендованного заводом-изготовителем.

Такие системы могут использоваться как для резервного электроснабжения, так и для полностью автономного электропитания объекта (РМ-2696 – Инструкция по расчету электрических нагрузок. М.: Изд-во стандартов, 2001). В инверторах предусмотрены настройки, позволяющие приоритетно использовать альтернативные источники энергии, а

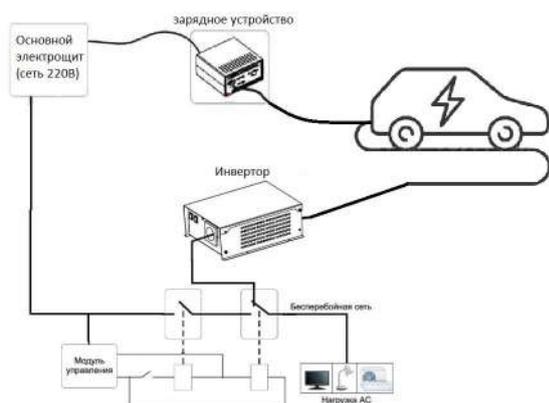


Рисунок 3 – Схема инверторного режима на базе зарядной станции электромобиля

центральная сеть или генератор будут подключаться только по мере необходимости. Такие режимы позволяют значительно экономить сетевую электроэнергию или топливо для генератора (РД 34.03.603 – Правила применения и испытания средств защиты, используемых в электроустановках, технические требования к ним. М.: Изд-во стандартов, 2003).

В случае применения системных контроллеров и панелей управления пользователь может дистанционно, через Интернет, контролировать работу инверторной системы с помощью компьютера, планшета или смартфона. Схема инверторного режима показана на рисунке 3.

Основной задачей данной статьи является моделирование работы on-line-системы, состоящей из газо-, дизель-генератора (источник сети) и инвертора напряжения, на примере зарядной станции электромобиля (рисунок 4).

Газогенератор создает трехфазное напряжение сети 380 В (50 Гц). При наличии избыточной мощности на нагрузке автономный инвертор напряжения начинает заряжать АКБ до достижения уровня заряда 90 % (после 90 % происходит сброс избыточного тока на резистор). При невозможности газогенератора обеспечить необходимую мощность на нагрузке АИН начинает отдавать мощность на нагрузку в режиме ведомого, используя заряд АКБ. При выключенном генераторе АИН полностью обеспечивает мощность на нагрузке в режиме ведущего, после включения генератора АИН переходит в режим ведомого (Инструкция по устройству молниезащиты зданий, строений и производственных коммуникаций. СО 153-343.21.122–2003).

Моделирование системы электропитания на базе трехфазного АИНа в пакете MATLAB Simulink. Имитационное моделирование автономной системы электропитания на базе трехфазного инвертора осуществлено в пакете MATLAB Simulink и состоит из генератора, инвертора, системы управления инверторами нагрузки (рисунок 5).

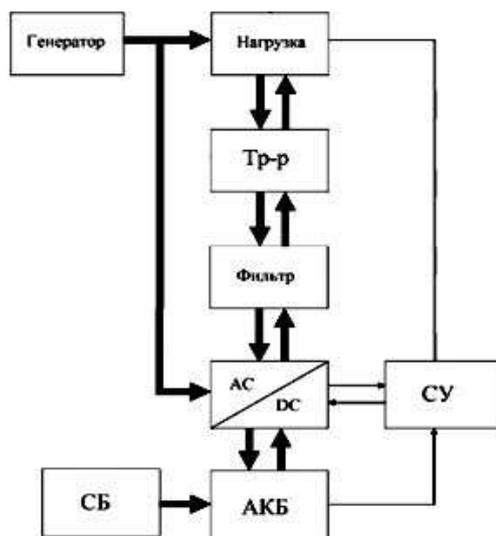


Рисунок 4 – Схема исследуемой энергетической установки: Тр-р – силовой трансформатор; AC/DC – двунаправленный инвертор; СУ – система управления; СБ – зарядная станция электромотоцикла; АКБ – аккумуляторная батарея

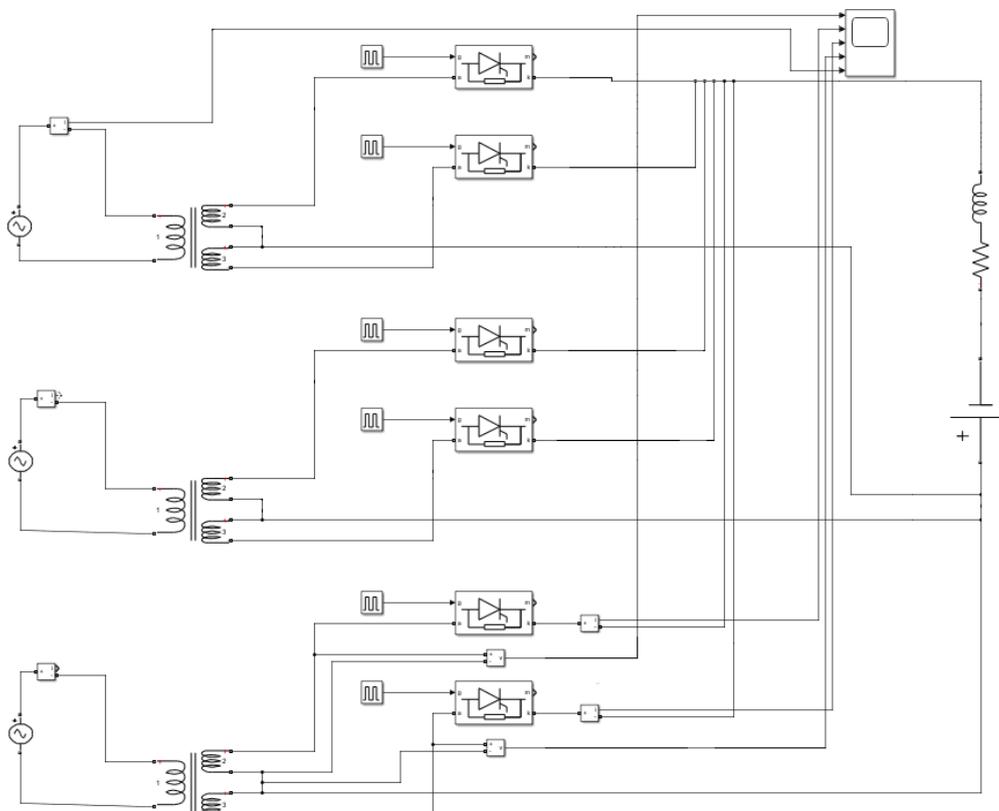


Рисунок 5 – Схема собранной модели организации инверторного режима зарядной станции электромотоцикла

С использованием предложенной модели проведен анализ влияния инверторного режима зарядных станций электромотоциклов на качество электроэнергии в сети 10/0,4 кВ Новосибирских электрических сетей.

Вопросы надежного и качественного энергоснабжения потребителя, «расшивки узких мест», а также решение проблемы энергосбережения обосновывают актуальность организации инверторного режима при создании зарядных станций электромобилей (Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 10 – 110 кВ).

Проблема качества электроэнергии (КЭ) в системах электроснабжения в настоящее время является одной из наиболее важных проблем в энергетике, так как КЭ является существенным фактором, влияющим на эффективность режимов энергосистемы и потребителей, особенно в эру «капризного потребителя». Качество электроэнергии определяется надежной и устойчивой работой электропередачи [11].

Особенно актуальна данная проблема в сетях низкого напряжения, так как увеличение количества мелких нелинейных электропотребителей (компьютерная техника, телеаппаратура, аудио- и видеотехника, бытовые электроприборы, зарядные устройства и др.) происходит очень быстро.

Одной из причин снижения качества электроэнергии являются нелинейные нагрузки, которые генерируют электромагнитные помехи, а те, в свою очередь, приводят к искажениям синусоидальности кривых тока и напряжения, что снижает качество электроэнергии.

Поскольку зарядное устройство электромобиля при организации инверторного режима является нелинейной нагрузкой и помимо увеличения нагрузки на электросетевую инфраструктуру может быть причиной ухудшения качества электроэнергии за счет генерирования гармонических искажений, то необходим анализ влияния электромобилей на качество электроснабжения потребителя согласно ГОСТ 32144–2013 [12].

Зададим ток 10 А. На рисунке 6 представлены значения напряжения и тока инвертора в режиме ведомого, а также тока нагрузки, напряжения и тока генератора при разряде АКБ.

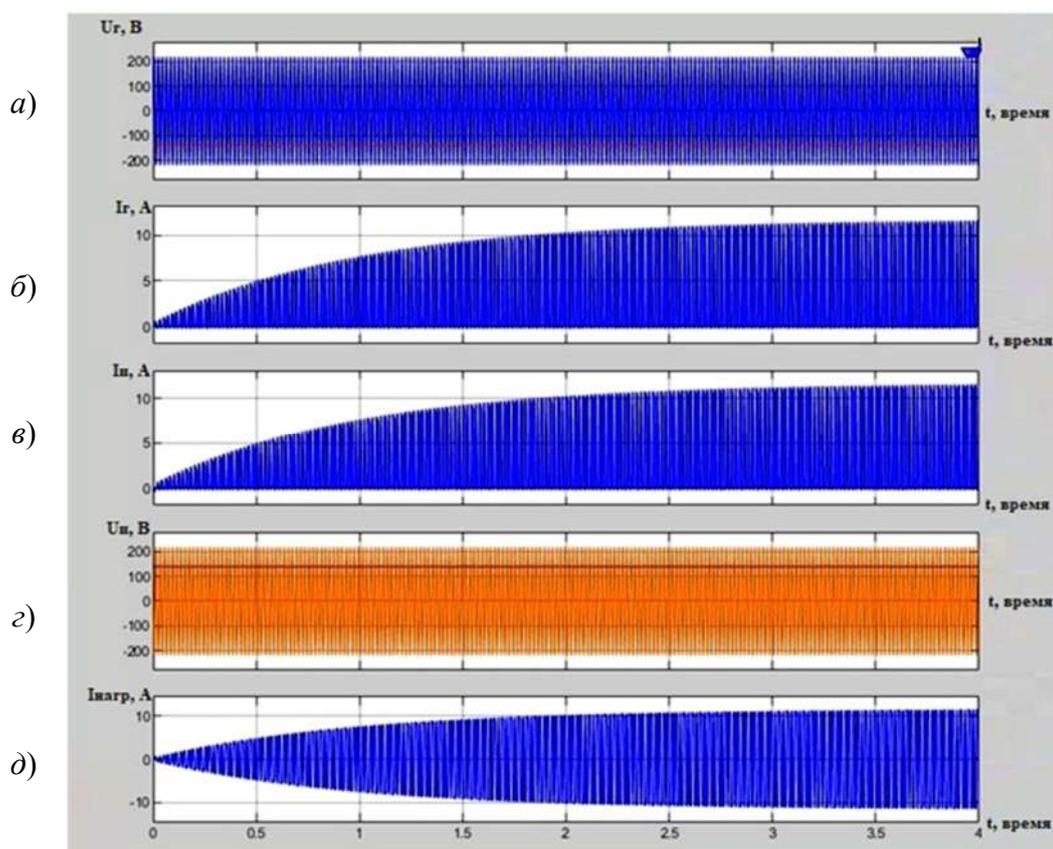


Рисунок 6 – Напряжение (а) и ток (б) генератора, напряжение (в) и ток (г) инвертора в режиме ведомого и ток нагрузки (д)

Гармонические искажения приводят к увеличению потребляемой мощности и к снижению качества электроэнергии, тем более что в сетях до 1000 В основные потери мощности происходят именно от наличия несинусоидальности кривой тока и напряжения. Наиболее значимой с точки зрения отражения физической природы потерь мощности является несинусоидальность кривой тока, которая нормируется ГОСТ 30804.3.2–2013 и ГОСТ 30804.3.12–2013).

Несинусоидальный ток электрической сети приводит к ряду последствий, среди которых отмечают такие:

появление дополнительных потерь энергии в распределительных трансформаторах и проводах [12];

появление помех, мешающих нормальному функционированию подключаемого оборудования (РД 34.03.603 – Правила применения и испытания средств защиты, используемых в электроустановках, технические требования к ним. М.: Изд-во стандартов, 2003);

снижение срока службы и пропускной способности электрической сети;

повышение опасности производства на опасных производственных объектах.

Хотя в работе применение инвертора на базе высокочастотных современных полупроводниковых элементов позволяет достичь высокого уровня фильтрации гармонических составляющих, поиск и оценка эффективности способа коррекции формы кривой выходного напряжения и тока для трехфазных инверторов и приближение этой кривой к синусоидальной форме для устранения негативного воздействия высших гармоник напряжения являются довольно актуальными задачами.

Индуктивности трансформаторов выступают как фильтровые устройства, поскольку их индуктивность рассеяния в схеме замещения можно рассматривать как продольную индуктивность. В этом случае систему, включающую в себя инвертор и силовой трансформатор, можно рассматривать как обычный инвертор, дающий модифицированный синус.

В такой схеме вместо многократной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) за период достаточно использовать фазовую модуляцию, которая в данном случае будет рассматриваться как однократная ШИМ за рабочий период.

Исследование в среде Simulink показало, что коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения не будет превышать 16 %.

Технико-экономическое обоснование проекта организации инверторного режима зарядной станции электромобиля. С целью определения эффективности рассматриваемого проекта был произведен расчет его себестоимости в годовом исчислении. В таблицу 2 сведены данные по экономии указанных выше эксплуатационных затрат.

Для обоснования эффективности функционирования зарядной станции в рамках энергосистемы проведем технико-экономические расчеты.

Величина годовых эксплуатационных затрат по зарядной станции приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Годовые эксплуатационные затраты

Статья затрат	Базовый вариант, тыс. руб. /год
Амортизационные отчисления	80,084
Расходы на содержание оборудования внедряемого варианта	39,06
Фонд заработной платы	1207,3
Отчисления на социальные нужды	365,9
Прочие эксплуатационные затраты (10 %)	169,344
Итого	1861,7

Таким образом, себестоимость проекта составляет 1861,7 тыс. руб. /год.

Величина прибыли от реализации проекта (годовой прирост прибыли от внедрения мероприятия) формируется за счет реализации услуг по зарядке электромобилей.

Средняя стоимость полной зарядки электромобиля $C_{зар}$ составляет в среднем 500 руб. Полный заряд обеспечивает электромобилю запас хода в $L_{зар} = 280 - 320$ км. При среднем пробеге в год $L_{год} = 25000$ км стоимость заряда одного автомобиля

$$C_{обсл} = C_{зар} \cdot \frac{L_{год}}{L_{зар}} = 500 \cdot \frac{25000}{300} = 41667 \text{ руб./год.}$$

Тогда при среднем количестве электромобилей, обслуживаемых на данной станции, $n = 60$ величина годовой прибыли от реализации проекта

$$П = 41,667 \cdot 60 = 2500 \text{ тыс. руб.}$$

При тарифе по Новосибирской области 2,68 руб. /кВт · ч получаем выработку электроэнергии: $ВЭ = \frac{2500000}{2,68} = 932835$ кВт · ч.

Далее рассчитываем себестоимость производства электрической энергии для зарядной станции:

$$СС = \frac{1861700}{932835} = 1,99 \text{ руб./кВт · ч.}$$

Таким образом, себестоимость производства электроэнергии составляет 1,99 руб. /кВт · ч. И это означает, что строительство данной зарядной станции для электромобилей является эффективным, поскольку себестоимость электроэнергии при питании от системы электроснабжения (СЭС) ниже, чем при питании от стационарной сети, следовательно, зарядная станция будет пользоваться спросом.

Исходя из технико-экономических расчетов можно сделать вывод о том, что себестоимость электроэнергии при питании от зарядной станции электромобиля ниже, чем при питании от стационарной сети, следовательно, зарядная станция будет пользоваться спросом: $СС = 1,99$ руб. /кВт · ч. Конкурентоспособность данного источника электроснабжения обосновывается отсутствием вредного воздействия на окружающую среду, а также дает возможность существенно повысить эффективность применения и проектирования электрических распределительных сетей за счет управляемой распределенной нагрузки; увеличить полезный отпуск электроэнергии в сеть за счет организации инверторного режима; обеспечить выравнивание «провала» в ночное время суток профиля нагрузок энергосистемы; при внедрении новейших технологий V2G рассматривать электромобили как распределенные накопители электроэнергии для покрытия пиковых нагрузок энергосистемы; существенно повысить эффективность применения электрических распределительных сетей и увеличить полезный отпуск электроэнергии.

В статье рассмотрены организация и проектирование инверторного режима для зарядной станции электромобилей, осуществлены моделирование и анализ режимов работы зарядной подстанции в пакете MATLAB Simulink и решены следующие основные задачи:

проанализированы принципы работы зарядных станций и возможности организации инверторного режима их работы;

показано, что при составлении рациональных схем трехфазных инверторов напряжений целесообразно использовать основы теории структурного синтеза выпрямителей, где статический преобразователь рода тока представлен как совокупность топологических структур из ветвей, образованных силовыми полупроводниками (СПП) и обмотками силового трансформатора. Такое представление позволяет исключить из общего перечня реактивные элементы и связанные с ними ограничения, приводящие к недостаткам в работе трехфазных инверторов напряжений;

реализовано моделирование и проведен анализ режимов работы зарядной подстанции в пакете Matlab Simulink и показано, что применение современных управляемых полупроводников в мостовой схеме выпрямителя в сочетании с силовыми трансформаторами на высоких частотах позволяет достичь высокого уровня фильтрации и соответствовать требованиям стандарта по качеству электроэнергии ГОСТ 32144–2013;

проведено технико-экономическое обоснование проектирования зарядной подстанции электромобилей в условиях мегаполиса. Исходя из технико-экономических расчетов получена себестоимость электроэнергии при питании от зарядной станции электромобиля, которая оказалась ниже, чем при питании от стационарной сети, следовательно, зарядная станция будет пользоваться спросом, $CC = 1,99$ руб. /кВт · ч. Все это делает зарядные станции конкурентоспособными с точки зрения выдачи электроэнергии в сеть по сравнению с традиционным источникам энергоснабжения, поскольку наряду с приведенными выше преимуществами достигается улучшение экологической обстановки в регионах.

Список литературы

1. Ситуация на рынке и перспективы развития зарядных станций для автомобилей в России // vc.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://vc.ru/u/229919-kate-skvortsova/272232-perspektivu-razvitiya-rynka-elektromobiley-i-zaryadnoy-infrastruktury-rossii/> (дата обращения: 24.05.2023).
2. Маньков, В.Д. Основы проектирования систем электроснабжения : справочное пособие. – Санкт-Петербург : НОУ ДПО «УМИТЦ Электросервис», 2010 – 664 с. – Текст : непосредственный.
3. Скундин, А. М. Современное состояние и перспективы развития исследований литиевых аккумуляторов / А. М. Скундин, О. Н. Ефимов, О. В. Ярмоленко. – Текст : непосредственный // Успехи химии. – 2002. – Т. 71. – № 4. – С. 378–398.
4. Проценко, Н. А. Расчетно-экспериментальная оценка распределения температур в случае технологических сбоев в работе литий-ионного аккумулятора космического назначения / Н. А. Проценко, В. Ю. Лапшин, Ж. М. Бледнова. – Текст : непосредственный // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12. – № 4-3. – С. 596–600.
5. Ютт, В. Е. Перспективные системы тягового электрооборудования для транспортных средств / В. Е. Ютт, К. М. Сидоров, Т. В. Голубчик. – Текст : непосредственный // Вестник МАДИ. – 2012. – № 1 (28). – С. 56а–63.
6. Борс, Н. И. Электромобили как транспорт будущего / Н. И. Борс, Д. Ш. Муратов, Л. А. Пимукова. – Текст : непосредственный // Итоги 2015 года: идеи, достижения : сборник материалов региональной студенческой научно-практической конференции с всероссийским участием / Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. – Казань, 2015. – С. 105–108.
7. Джайлаубеков, Е. А. Электромобили – будущее городского транспорта. Перспективы развития / Е. А. Джайлаубеков, М. А. Нартов. – Текст : непосредственный // Вестник КазАТК. – 2014. – № 1 (86). – С. 47–53.
8. Строганов, В. И. Моделирование систем электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой в процессах проектирования и производства : монография / В. И. Строганов, В. Н. Козловский. – Москва : Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2014. – 264 с. – Текст : непосредственный.
9. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д. Л. Файбисовича. – Москва : Энас, 2006. – 320 с. – Текст : непосредственный.
10. Мировой рынок электромобилей 2021 г. // e-cars.tech : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://e-cars.tech/analitika/skolko-elektromobiley-v-mire-svodnaya-analitika-na-konets-2021-goda/> (дата обращения: 24.05.2023).

11. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – Москва : Высшая школа, 2001. – 327 с. – Текст : непосредственный.
12. Беспроводная зарядка автомобилей // en.habr.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://habr.com/en/company/vdsina/blog/559978/> (дата обращения: 24.05.2023).

References

1. *Situatsiya na rynkei perspektivy razvitiya zaryadnykh stantsij dlya avtomobilej v Rossii* [Market situation and prospects for the development of car charging stations in Russia]. Available at: <https://vc.ru/u/229919-kate-skvortsova/272232-perspektivy-razvitiya-rynka-elektromobilej-i-zaryadnoy-infrastruktury-rossii> (accessed 24.05.2023).
2. Mankov V.D. *Osnovy proektirovaniya sistem elektrosnabzheniya. Spravochnoe posobie* [Fundamentals of designing power supply systems. Reference manual]. Saint-Petersburg, NOU DPO UMITTS Elektroservis Publ., 2010, 664 p. (In Russian).
3. Skundin A.M., Efimov O.N., Yarmolenko O.V. The state-of-the-art and prospects for the development of rechargeable lithium batteries. *Uspekhi khimii – Russian Chemical Reviews*, 2002, vol. 71, no. 4, pp. 378-398 (In Russian).
4. Protsenko N.A., Lapshin V. Yu., Blednova Zh.M. Computational and experimental assessment of temperature distribution in case of technological failures in the operation of a lithium-ion battery for space purposes. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk – Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2010, vol. 12, no. 4-3, pp. 596-600 (In Russian).
5. Yutt V.E., Sidorov K.M., Golubchik T.V. Advanced propulsion systems for electric and hybrid vehicles. *Vestnik MADI – Bulletin of MADI*, 2012, no. 1 (28), pp. 56a-63 (In Russian).
6. Bors N.I., Muratov D.Sh., Pimukova L.A. [Electric vehicles as transport of the future]. *Itogi 2015 goda: idei, dostizheniia : sbornik materialov regional'noi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s vserossiiskim uchastiem* [Results of 2015: ideas, achievements : collection of materials of the regional student scientific and practical conference with All-Russian participation]. Kazan, 2015, pp. 105-108 (In Russian).
7. Dzhajlaubekov E.A., Nartov M.A. Electric vehicles are the future of urban transport. Prospects for development. *Vestnik KazATK – Bulletin of KazATK*, 2014, no. 1 (86), pp. 47-53 (In Russian).
8. Stroganov V.I., Kozlovskii V.N. *Modelirovanie sistem e'lektromobilej i avtomobilej s kombinirovannoj silovoj ustanovkoj v processax proektirovaniya i proizvodstva: monografiya* [Modeling of systems of electric vehicles and vehicles with a combined power plant in the processes of design and production: monograph]. Moscow, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) Publ., 2014, 264 p. (In Russian).
9. Faibisovich D.L. ed. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setej* [Electrical Network Design Handbook]. Moscow, Enas Publ., 2006, 320 p. (In Russian).
10. *Mirovoj rynek elektromobilej 2021* [Global Electric Vehicle Market 2021]. Available at: <https://e-cars.tech/analitika/skolko-elektromobilej-v-mire-svodnaya-analitika-na-konets-2021-goda> (accessed 24.05.2023).
11. Kopylov I.P. *Matematicheskoe modelirovanie Elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow, High School Publ., 2001, 327 p. (In Russian).
12. *Besprovodnaya zaryadka avtomobilej* [Wireless car charging]. Available at: <https://habr.com/en/company/vdsina/blog/559978/> (accessed 24.05.2023).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мятеж Татьяна Владимировна

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Карла Маркса пр., д. 20, корпус 2, г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения предприятий», НГТУ.

Тел.: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: tatianamyateg@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Myatezh Tatiana Vladimirovna

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

20, building 2, Karl Marx av., Novosibirsk, 630073, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Power Supply Systems for Enterprises», NSTU.

Phone: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: tatianamyateg@mail.ru

Любченко Валентина Яковлевна

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Карла Маркса пр., д. 20, корпус 2, г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения предприятий», НГТУ.

Тел.: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: lyubchenko57@mail.ru

Lubchenko Valentina Yakovlevna

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

20, building 2, Karl Marx av., Novosibirsk, 630073, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Power Supply Systems for Enterprises», NSTU.

Phone: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: lyubchenko57@mail.ru

Могиленко Егор Александрович

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Карла Маркса пр., д. 20, корпус 2, г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация.

Магистр кафедры «Системы электроснабжения предприятий», НГТУ.

Тел.: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: mogilenko.e@mail.ru

Mogilenko Egor Aleksandrovich

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

20, building 2, Karl Marx av., Novosibirsk, 630073, the Russian Federation.

Master of the department «Power Supply Systems for Enterprises», NSTU.

Phone: +7 (3833) 46-15-51.

E-mail: mogilenko.e@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Мятеж, Т. В. Исследование инверторного режима зарядных станций электромобилей на примере подстанции Театральная Новосибирской энергосистемы / Т. В. Мятеж, В. Я. Любченко, Е. А. Могиленко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 3 (55). – С. 106 – 120.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Myatezh T.V., Lubchenko V.Ya., Mogilenko E.A. Study of the charging station inverter modes for electric vehicles on the example of the Novosibirsk energy system Teatralnaya substation. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 3 (55), pp. 106-120 (In Russian).

УДК 621.311.001.57

Ю. А. Секретарев, А. А. Горшунов

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), г. Новосибирск, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ С РАЗЛИЧНЫМИ СХЕМАМИ ПИТАНИЯ

Аннотация. В статье рассматривается результат моделирования значений текущего технического состояния электрооборудования на основе ранее разработанных математических моделей. В процессе моделирования было рассмотрено 72 схемы и выбрано для моделирования четыре типовых схемы с различным количеством одновременно работающего оборудования: одноцепные воздушные линии без трансформаторов, двухцепные воздушные линии без трансформаторов, одноцепные воздушные линии с трансформатором и двухцепные воздушные линии с трансформаторами. Моделируемое значение текущего состояния в зависимости от количества оборудования, за которым осуществляется мониторинг, меняет свои пределы. В ходе работы для каждой из схем был получен ряд значений, имитирующий выборочную совокупность индекса технического состояния. Была выдвинута гипотеза о нормальном распределении генеральных совокупностей и проведена их проверка с помощью критерия согласия Пирсона. При увеличении числа учитываемого в процессе мониторинга электрооборудования замечено уменьшение среднего значения индекса технического состояния. Данный показатель имеет накопительную оценку технического состояния всей рассматриваемой системы электроснабжения. При комплексной оценке надежности систем электроснабжения резервируемые и нерезервируемые элементы учитываются при расчетах схемной надежности. Чтобы снизить вероятность отказа электрооборудования, необходимо проводить регулярную оценку его технического состояния, а также выполнять плановое техническое обслуживание и ремонтные работы. Для получения более точной оценки надежности можно использовать дополнительную информацию о состоянии оборудования, такую как данные о техническом обслуживании, ремонтах, дефектах. Эти данные могут быть использованы для определения периодов технического обслуживания и ремонта, что поможет снизить риски простоя оборудования.

Ключевые слова: индекс технического состояния, моделирование мониторинга за техническим состоянием, электрооборудование систем электроснабжения, закон нормального распределения, критерий согласия Пирсона.

Yuri A. Sekretarev, Andrey A. Gorshunov

Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, the Russian Federation

MODELING OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF OIL PRODUCTION FACILITIES WITH VARIOUS POWER SCHEMES

Abstract. The article presents the result of modeling the values of the current technical condition of electrical equipment based on mathematical models that the authors developed earlier. During the simulation, 72 circuits were considered and four typical circuits with different amounts of simultaneously operating equipment were selected for modeling: single-circuit overhead lines without transformers, double-circuit overhead lines without transformers, single-circuit overhead lines with a transformer and double-circuit overhead lines with transformers. The simulated value of the current state changes its limits depending on the amount of equipment. In the course of the work, the model simulated a sample set of the technical condition index. The authors hypothesized the normal distribution of general aggregates and tested the using the Pearson consensus criterion. The result of the verification using the consent criterion confirms the hypothesis put forward. With an increase in the number of electrical equipment, the average value of the technical condition indicator decreases during the monitoring process. This indicator has a cumulative assessment of the technical condition of the entire power supply system under consideration. In order to reduce the probability of failure of electrical equipment, it is necessary to conduct a regular assessment of its technical condition, as well as perform scheduled maintenance and repair work. It is necessary to use additional information about the condition of the equipment to determine maintenance and repair periods, which will help reduce the risks of equipment downtime.

Keywords: technical condition index, modeling of monitoring of technical condition, electrical equipment of power supply systems, the law of normal distribution, Pearson's consent criterion.

Оценка технического состояния электрооборудования является важной процедурой для обеспечения безопасности и эффективной работы систем электроснабжения любого предприятия. Она проводится для выявления потенциальных проблем и повреждений оборудования, которые могут привести к авариям или сбоям в работе системы. Эти оценки позволяют определить необходимость ремонта или замены оборудования, что улучшает его надежность и продлевает срок его эксплуатации.

Необходимо проводить регулярную оценку технического состояния оборудования, выполнять плановое техническое обслуживание и ремонтные работы, использовать высококачественное оборудование и комплектующие, использовать системы мониторинга и диагностики. В процессе оценки персонал может использовать различные методы и инструменты, такие как визуальный осмотр, измерение параметров, анализ данных и тестирование. Данный процесс является важным этапом в обеспечении надежной работы и должен проводиться только квалифицированным персоналом, обладающим соответствующей квалификацией и опытом работы в данной области.

Оценка надежности системы электроснабжения основывается на комплексном подходе к ее получению.

Во-первых, она, безусловно, зависит от текущей надежности схемы электроснабжения, во-вторых, от текущего состояния элементов и узлов, составляющих данную схему. Поэтому модель состоит из двух взаимосвязанных частей.

Надежность схемы системы электроснабжения основывается на расчете показателей надежности (параметра потока отказов и времени восстановления) с учетом схемы соединения (последовательное или параллельное) и выражается значением вероятности безотказной работы P [1].

В узлах и деталях возникают прогрессирующие дефекты, которые позволяют продолжать эксплуатацию оборудования в нормальном режиме, при этом значения показателей надежности становятся ниже.

Существенное снижение показателей надежности является серьезной проблемой, которая может привести к значительным экономическим последствиям (простой производства, потеря продукции, увеличение расходов на ремонт и замену оборудования и др.). Для уменьшения возможных отказов необходимо проводить регулярную оценку технического состояния оборудования, выполнять плановое техническое обслуживание и ремонтные работы, использовать высококачественное оборудование и комплектующие, применять системы мониторинга и диагностики [2, 3].

Каждая единица электрооборудования имеет в своем составе некоторое количество функциональных узлов, обладающих разным уровнем значимости, выраженным весовыми коэффициентами. Весовые коэффициенты не имеют общепринятых значений и определяются группой экспертов на предприятиях. Техническое состояние каждого функционального узла определяется оценкой дефектов, которые могут возникать и развиваться в процессе эксплуатации оборудования.

С целью корректировки значения P проводится оценка технического состояния группы факторов и деталей для выявления дефектов внутри функционального узла и на основе полученных оценок производится расчет индекса технического состояния функциональных узлов рассматриваемого электрооборудования. Интегральным показателем текущего технического состояния оборудования является индекс технического состояния (ИТС) единицы электрооборудования $J_{эл. об.}$, расчет которого производится путем сложения значений ИТС каждого функционального узла с учетом их весовых коэффициентов.

Функциональные узлы так же, как и их весовые коэффициенты, определяются экспертами на основе их знаний и опыта эксплуатации с учетом конкретной конструкции и принципа действия основного элемента системы электроснабжения (типа линии электропередачи, трансформатора, выключателя и т. д.).

Показатель $J_{эл. об.}$ может принимать значения в диапазоне от наихудшего – 0 до наилучшего – 1, однако в ходе эксплуатации оборудования данный показатель всегда принимает значение менее 1 [4, 5]. Учет ИТС оборудования позволяет определить актуальное значение вероятности безотказной работы P_J , которое будет отличаться от значения вероятности P , полученного в ходе расчетов схемной надежности системы электроснабжения. Для оценки надежности, имеющей приближенное к истинному значение, производится расчет по формуле

$$P_J = P \times J_{эл. об.} = e^{-\omega \times T} \times \left(\sum_1^i KB_i \times J_{i.уз} \right), \quad (1)$$

где ω – параметр потока отказов элемента, 1/год;

P – вероятность безотказной работы, характеризующая схемную надежность;

$J_{эл. об.}$ – индекс технического состояния единицы электрооборудования;

T – интервал времени, в течение которого рассматриваются события, год;

i – количество функциональных узлов;

KB_i – весовой коэффициент i -го функционального узла;

$J_{i.уз}$ – индекс технического состояния i -го функционального узла.

На сегодняшний день отсутствуют строгие математические модели, которые позволяют оценить степень влияния поломок, неисправностей и дефектов изделия на последующий его отказ, который будет сопровождаться определенными последствиями, а именно заменой или восстановительным ремонтом [6]. Нет и статистической информации подобного рода. Поэтому к решению этой проблемы вынужденно привлекается аппарат экспертных оценок, который позволяет выявить интересующие связи между поломками и дефектами и последующими отказами.

Согласно одной из методик оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей, утвержденной Министерством энергетики РФ, для расчета ИТС функциональных узлов

необходимо произвести оценку каждого узла при известных весовых коэффициентах [7]. На основе проведенной специалистами ПАО «Газпромнефть» экспертизы были получены весовые коэффициенты для функциональных узлов воздушных линий и трансформаторов, приведенные в таблицах 1 и 2 соответственно. Сумма весовых коэффициентов функциональных узлов каждой единицы электрооборудования равна единице.

Таблица 1 – Весовые коэффициенты функциональных узлов воздушной линии

Единица оборудования	Номер узла	Функциональный узел	Весовой коэффициент
Воздушная линия	1	Крепление опоры	0,1
	2	Приставка, стойка	0,03
	3	Траверса	0,07
	4	Заземляющее устройство	0,03
	5	Коммутационные аппараты, разрядники	0,1
	6	Трасса воздушной линии (ВЛ)	0,2
	7	Провод, кабельная вставка	0,47

Таблица 2 – Весовые коэффициенты функциональных узлов трансформатора

Единица оборудования	Номер узла	Функциональный узел	Весовой коэффициент
Трансформатор	1	Изоляционная система	0,32
	2	Магнитная система	0,18
	3	Обмотки	0,18
	4	Высоковольтный ввод	0,13
	5	Устройство регулирования напряжения под нагрузкой (РПН)	0,1
	6	Система охлаждения	0,09

По методике оценки ИТС необходимо определять числовые значения оценок. Предполагается, что оценка отражает текущее техническое состояние функционального узла или степень развития дефекта в функциональном узле относительно других функциональных узлов, входящих в рассматриваемую единицу электрооборудования. Весовой коэффициент показывает уровень значимости функционального узла в составе оборудования и отражает долю его влияния на эксплуатацию оборудования.

Как было отмечено выше, отсутствие статистики по появлению и скорости развития дефектов в функциональных узлах электрооборудования привело к предположению о случайном характере появления и развития дефектов. Чтобы оценить степень влияния ИТС на схемную надежность, была разработана и реализована математическая модель (2), основанная на использовании метода Монте-Карло (метода статистических испытаний) для получения статистической информации о данном процессе.

Оценка состояния функциональных узлов является случайной величиной, которая оценивается с помощью весовых показателей, нормированные значения которых изменяются в диапазоне от 0 до 1. Именно это послужило основанием для выбора генератора псевдослучайных чисел, который подчиняется равномерному закону распределения.

$$J_{\text{эл. об}} = \sum_1^i \left[\left(\frac{\sum_1^n RANDOM}{n} \right) \times KB_i \right], \quad (2)$$

где *RANDOM* – генератор псевдослучайных чисел для диапазона [0;1];
n – количество испытаний.

В предложенной модели производится генерация значений оценок технического состояния единицы электрооборудования $J_{эл. об.}$. Как было отмечено выше, каждая единица оборудования, которая является в данном контексте элементом системы электроснабжения, представляет собой совокупность функциональных узлов. Моделирование оценок производится по каждому функциональному узлу в соответствии с моделями (1) и (2) с учетом различных схем питания потребителей, о которых будет сказано ниже.

Для того чтобы привести сумму весовых коэффициентов по функциональным узлам схемы электроснабжения к единице, производится нормирование этих коэффициентов. Данная процедура необходима для согласования размерностей $J_{эл. об.}$ и вероятности безотказной работы P .

Результат нормирования приводится в таблице 3.

Таблица 3 – Весовые нормированные коэффициенты функциональных узлов электрооборудования

Единица оборудования	Номер узла	Функциональный узел	Весовой коэффициент
Трансформатор	1	Изоляционная система	0,16
	2	Магнитная система	0,09
	3	Обмотки	0,09
	4	Высоковольтный ввод	0,065
	5	Устройство РПН	0,05
	6	Система охлаждения	0,045
Воздушная линия	7	Крепление опоры	0,05
	8	Приставка, стойка	0,015
	9	Траверса	0,035
	10	Заземляющее устройство	0,015
	11	Коммутационные аппараты, разрядники	0,05
	12	Трасса ВЛ	0,1
	13	Провод, кабельная вставка	0,235

При моделировании двухцепных воздушных линий значения весовых коэффициентов 12-го и 13-го функциональных узлов в соответствии с данными таблицы 3 увеличиваются в два раза, так как обе линии располагаются на одной опоре.

Было рассмотрено 72 схемы электроснабжения объектов на нефтяном промысле Ханты-Мансийского автономного округа, имеющие в своем составе как двухцепные линии, так и одноцепные. Схемы с двухцепными линиями являются наиболее распространенными. Для исследования модели были проанализированы все рассмотренные схемы электроснабжения и выбраны несколько типовых вариантов, изображенных на рисунке 1.

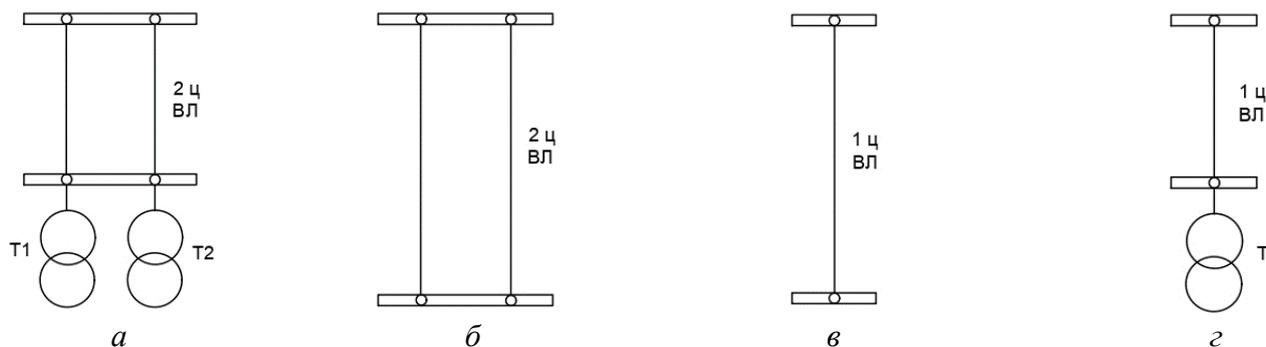


Рисунок 1 – Варианты схем с двухцепной линией с трансформаторами (а), двухцепной линией без трансформаторов (б), одноцепной линией без трансформатора (в) и одноцепной линией с трансформатором (г)

Математическая модель основана на генерации случайных чисел в некотором диапазоне. Необходимо определить закон распределения и разброс случайной величины в зависимости от вида и количества рассматриваемого электрооборудования. В настоящее время статис-

тическая информация о текущем техническом состоянии функциональных узлов и деталей электрооборудования отсутствует. Для получения имитационной выборочной совокупности (выборки) производится моделирование по формуле (2). Для репрезентативной выборки необходимо провести не менее 200 итераций. Первый процесс моделирования производился для варианта двухцепной воздушной линии с трансформаторами (рисунок 1, а).

Для удобной записи статистический материал подвергается обработке и строится статистический ряд, который представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Статистический ряд

Номер интервала	m_i	p_i^*	Диапазон интервалов
1	3	0,015	0,708 – 0,712
2	9	0,045	0,712 – 0,717
3	9	0,045	0,717 – 0,721
4	23	0,115	0,721 – 0,726
5	45	0,225	0,726 – 0,730
6	34	0,17	0,730 – 0,734
7	27	0,135	0,734 – 0,739
8	26	0,13	0,739 – 0,743
9	15	0,075	0,743 – 0,748
10	5	0,025	0,748 – 0,752
11	2	0,01	0,752 – 0,756
12	2	0,01	0,756 – 0,761

Математическое ожидание случайной дискретной величины $M(X)$ составило 0,732.

Выдвигается гипотеза H_0 , состоящая в том, что случайная моделируемая величина X подчиняется нормальному закону распределения. Параллельно выдвигается вторая гипотеза H_1 , состоящая в том, что величина X не подчиняется предполагаемому закону распределения.

Необходимо решить задачу о согласованности теоретического и статистического распределения. Для этого производится выравнивание с помощью теоретической кривой. Также требуется вычислить выборочное среднее значение и выборочное среднеквадратичное отклонение. Производится переход от интервального ряда к дискретному [8]. Далее теоретическая кривая накладывается на гистограмму на рисунке 2.

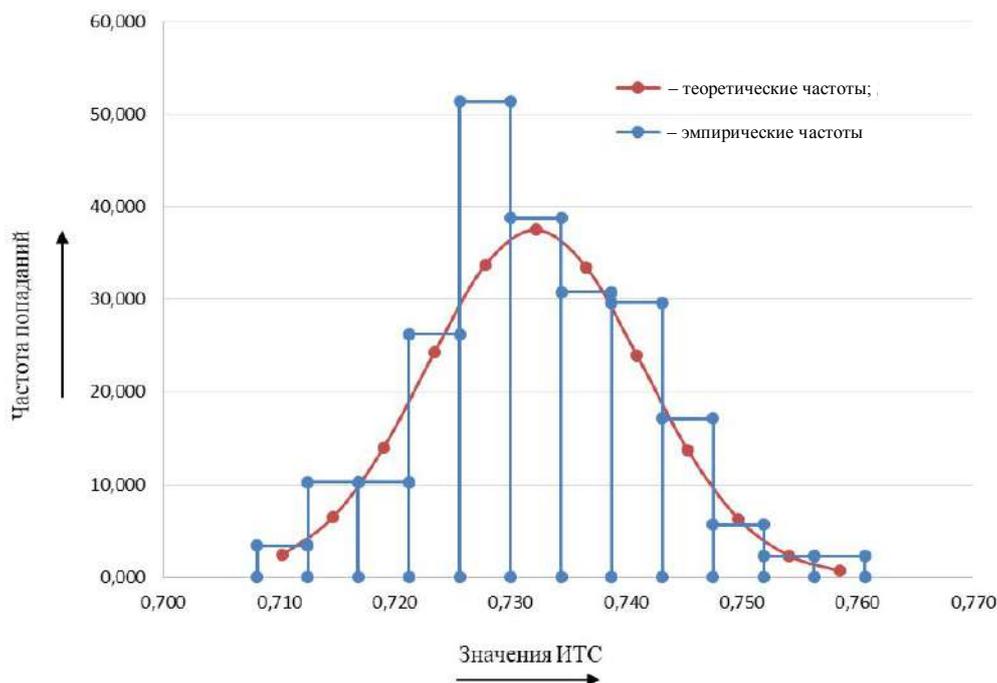


Рисунок 2 – Гистограммы теоретических и эмпирических частот для варианта а рисунка 1

Для нахождения различия между теоретическими и статистическими частотами применяется критерий согласия χ^2 (Пирсона). Необходимо произвести корректировку значений частот в полученных интервалах, эта процедура позволит избежать значительных неоправданных расхождений. Для этого объединяют соседние интервалы с значениями меньше пяти. Значение критерия Пирсона рассчитывается по формуле

$$\chi^2 = \sum \frac{(m_i - m'_i)^2}{m'_i}. \quad (3)$$

Наблюдаемое значение критерия Пирсона $\chi^2 = 9,203$.

Для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и степеней свободы $k = 7$ по работе [9] определяется критическое значение критерия, которое составляет 14,1.

Условие, при котором наблюдаемое значение не превышает критического ($9,2 < 14,1$), позволяет принять основную гипотезу H_0 .

Аналогично проверяются другие гипотезы о нормальном распределении для других вариантов схем. Результаты сводятся в таблицу 5.

Таблица 5 – Результаты проверки гипотез по критерию Пирсона

Вариант схемы	$M(X)$	k	Наблюдаемое χ^2	Критическое χ^2
2ц ВЛ	0,92015994	7	8,420	14,1
1ц ВЛ	0,55086108	7	1,963	14,1
1ц ВЛ + Тр-р	0,550665215	7	5,702	14,1

Гистограммы теоретических и эмпирических частот для различных вариантов схем приводятся на рисунках 3 – 5.

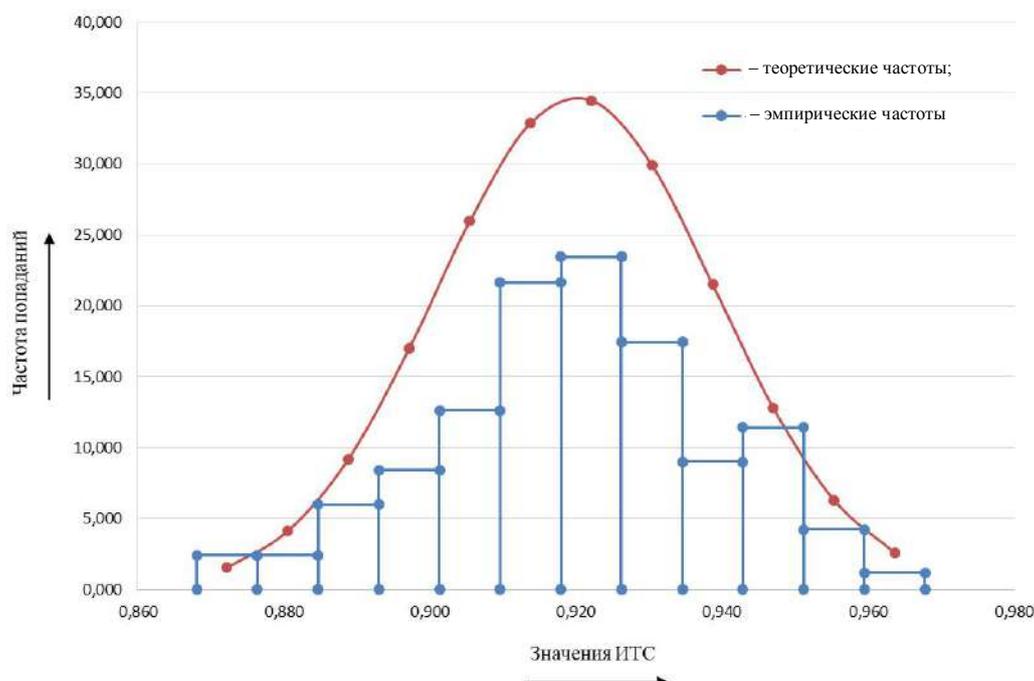


Рисунок 3 – Гистограммы теоретических и эмпирических частот для варианта с двухцепными ВЛ

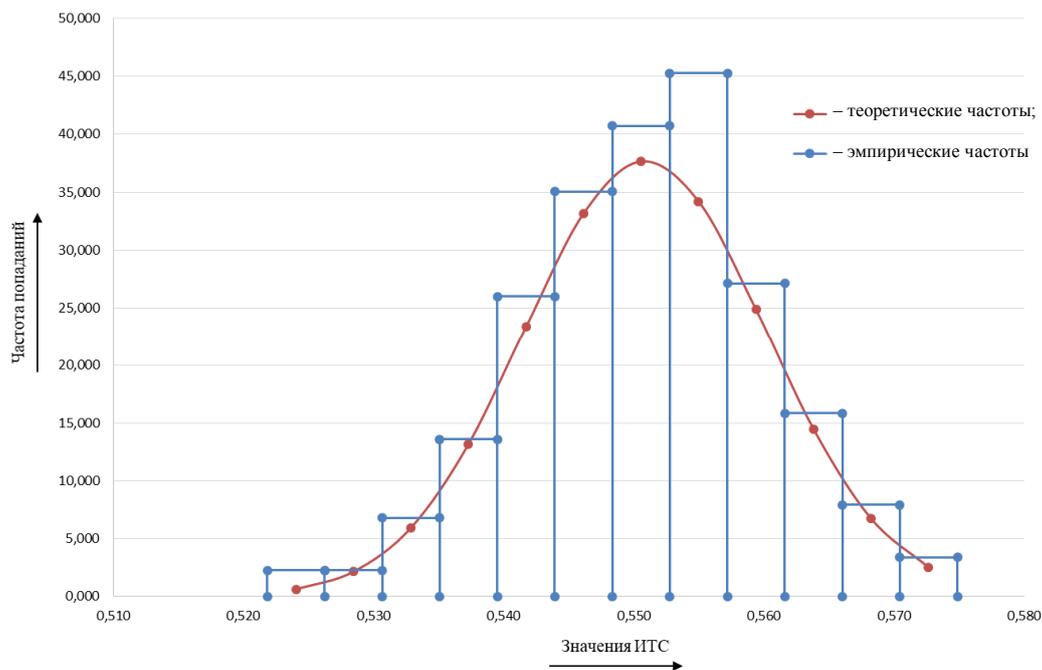


Рисунок 4 – Гистограммы теоретических и эмпирических частот для варианта с одноцепными ВЛ

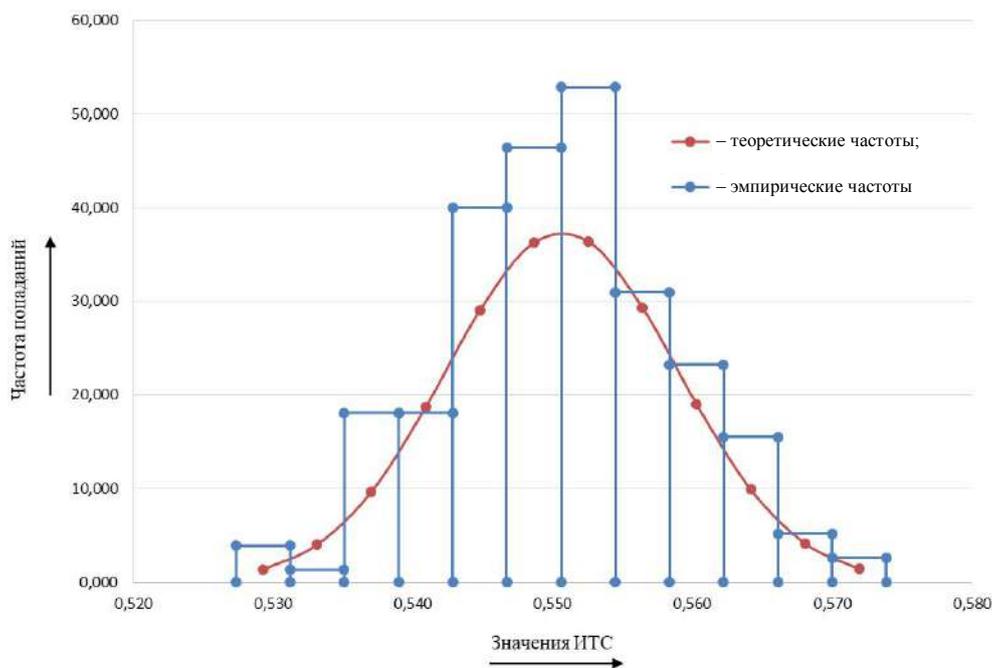


Рисунок 5 – Гистограммы теоретических и эмпирических частот для варианта с одноцепными ВЛ с трансформаторами

Во всех случаях гипотеза H_0 подтверждается. Следовательно, во всех случаях распределение случайной моделируемой величины, характеризующей текущее техническое состояние электрооборудования, подчиняется нормальному закону распределения. Результат моделирования подтверждается центральной предельной теоремой для одинаково распределенных слагаемых [8]. Теорема представлена выражением

$$Y = \sum_{i=1}^n X_i, \quad (4)$$

где n – количество слагаемых.

В исследуемой модели независимыми случайными величинами X_i являются генерируемые

оценки функциональных узлов электрооборудования [10]. Каждая величина подчиняется равномерному закону распределения.

Совмещенная гистограмма приводится на рисунке 6. Значение ИТС имеет накопительный характер. При моделировании значений мониторинга за техническим состоянием электрооборудования математическое ожидание общего показателя ИТС снижается при большем количестве учтенного оборудования.

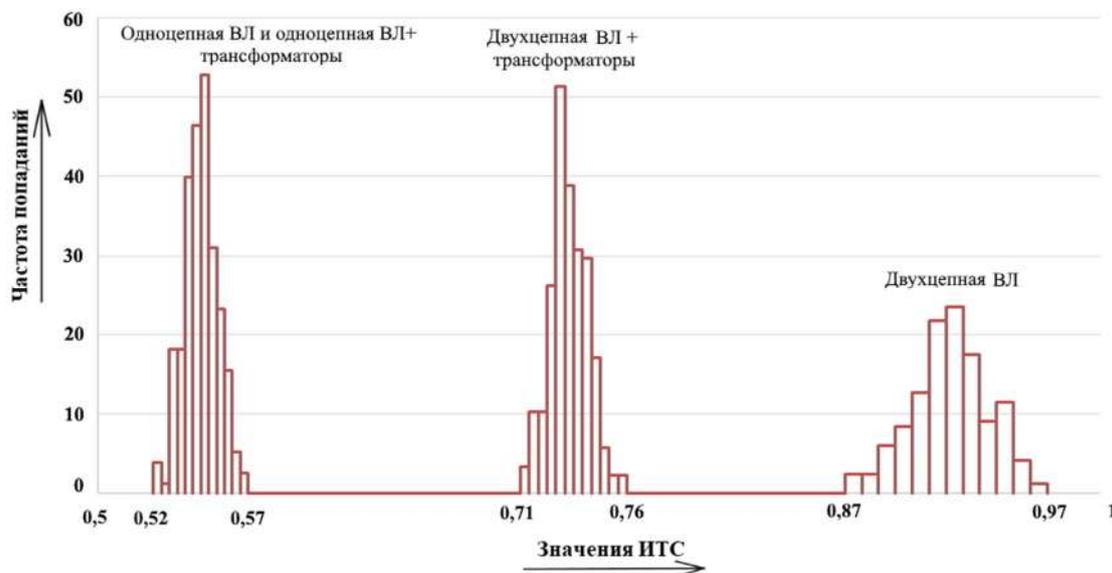


Рисунок 6 – Общая гистограмма частот

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Для возможности оценки текущего состояния электрооборудования в составе систем электроснабжения была разработана математическая модель, состоящая из двух взаимосвязанных частей, позволяющих учитывать как надежность схем электроснабжения, так и текущее техническое состояние функциональных узлов электрооборудования.

2. Из-за отсутствия статистической информации была разработана математическая модель, которая позволяет генерировать значения текущего технического состояния электрооборудования. С помощью данной модели были получены значения ИТС для нескольких типовых вариантов рассмотренных схем электроснабжения.

3. Было рассмотрено 72 схемы электроснабжения объектов нефтедобычи, из которых выбрано для моделирования четыре типовых схемы с различным количеством одновременно работающего оборудования.

4. Наиболее высокие значения индекса технического состояния были получены для схем электроснабжения с двухцепными воздушными линиями, они находятся в диапазоне от 0,87 до 0,97. Индекс технического состояния для схем, имеющих в своем составе как двухцепные линии, так и трансформаторы, принимает значения от 0,71 до 0,76. Наименьшие значения индекса технического состояния для схем электроснабжения с одноцепными воздушными линиями находятся в диапазоне от 0,52 до 0,57.

5. Предложенная система мониторинга обладает накопительным характером, т. е. чем больше функциональных узлов и элементов контролируется, тем ниже результирующий ИТС единицы электрооборудования.

6. Результат проверки по критерию согласия Пирсона позволил подтвердить выдвинутые гипотезы о нормальном распределении случайной величины ИТС при моделировании различных вариантов схем. Центральной предельной теоремой объясняется проявление нормального закона распределения случайной величины во время моделирования ИТС единиц электрооборудования в модели при заданном равномерном законе распределения случайной величины, характеризующей состояние функциональных узлов.

Список литературы

1. Секретарев, Ю. А. Моделирование технического состояния оборудования систем электроснабжения монопотребителей с учетом схемной надежности / Ю. А. Секретарев, А. А. Горшунов, Д. А. Меняйкин. – Текст : непосредственный // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2022. – № 3 (69). – С. 3–14.
2. Gitelman L.D., Kozhevnikov M.V., Chebotareva G.S., Kaimanova O.A. Asset Management of energy company based on risk-oriented strategy. *Energy Production and Management in the 21st Century IV*, 2020, vol. 246, pp. 125-135.
3. Ndawula M.B., Djokic S.Z., Hernando-Gil I. Reliability Enhancement in Power Networks under Uncertainty from Distributed Energy Resources // mdpi.com : сайт. – Текст электронный. – URL: www.mdpi.com/1996-1073/12/3/531 (дата обращения: 28.04.2023).
4. Секретарев, Ю. А. Выбор и принятия решений по управлению ремонтами энергооборудования в системах электроснабжения с монопотребителем / Ю. А. Секретарев, В. М. Левин. – Текст : непосредственный // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2021. – № 2 (83). – С. 17–25.
5. Секретарев, Ю. А. Оценка влияния на надежность системы электроснабжения различного рода дефектов ее основных элементов / Ю. А. Секретарев, В. М. Левин. – Текст : непосредственный // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – № 4 (44). – С. 55–63.
6. Байдюк, М. А. Оценка технического состояния и надежности электрических машин / М. А. Байдюк, Г. В. Комарова. – Текст : непосредственный // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2019. – № 3. – С. 78–84.
7. Приказ Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей»: (утвержден приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 26 июля 2017 г.) // <http://publication.pravo.gov.ru/> : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201710060003?rangeSize=1&index=1> (дата обращения: 20.04.2023).
8. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – Москва : Высшая школа, 2001. – 575 с. – Текст : непосредственный.
9. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – Москва : Высшая школа, 2003. – 479 с. – Текст : непосредственный.
10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022618655, Российская Федерация. Расчет надежности системы электроснабжения нефтяного промысла в рамках риск-ориентированного подхода : № 2022618356 : заявлено 13.05.2022 : опубликовано 13.05.2022 / Секретарев Ю. А., Горшунов А. А. – 1 с.: ил. – Текст : непосредственный.

References

1. Sekretarev Y.A., Gorshunov A.A., Menyain D.A. Modeling of the technical condition of an equipment of power supply systems of mono consumers taking into account circuit reliability. *Vesti vysshih uchebnyh zavedenij Chernozem'ya – News of higher educational institutions of the Chernozem region*, 2022, no. 3 (69), pp. 3-14 (In Russian).
2. Gitelman L.D., Kozhevnikov M.V., Chebotareva G.S., Kaimanova O.A. Asset Management of energy company based on risk-oriented strategy. *Energy Production and Management in the 21st Century IV*, 2020, vol. 246, pp. 125-135.
3. Ndawula M.B., Djokic S.Z., Hernando-Gil I. Reliability Enhancement in Power Networks under Uncertainty from Distributed Energy Resources. Available at: www.mdpi.com/1996-1073/12/3/531 (accessed 28.04.2023).

4. Sekretarev Y.A., Levin V.M. Selection and decision-making on managing repairs of power equipment in power supply systems with monoconsumer. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta – Newsletter of North-Caucasus Federal University*, 2021, no. 2 (83), pp. 17-25 (In Russian).

5. Sekretarev Y.A., Levin V.M. Evaluation of the effect on the reliability of the electrical supply system of a different kind of defects of its basic elements. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Bulletin of Kazan State Energy University*, 2019, no. 4 (44), pp. 55-63 (In Russian).

6. Bajdyuk M.A., Komarova G.V. Evaluating technical condition and reliability of electrical machines. *Izvestiia SPbGETU «LETI» – Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*, 2019, no. 3, pp. 78-84 (In Russian).

7. Order of the Ministry of Energy of Russia dated July 26, 2017 No. 676 «On approval of the methodology for assessing the technical condition of the main technological equipment and power transmission lines of power stations and electrical networks». Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201710060003?rangeSize=1&index=1> (accessed 20.04.2023). (In Russian).

8. Ventcel' E.S. *Teoriya veroyatnostej* [Probability theory]. Moscow, High School Publ., 2001, 575 p. (In Russian).

9. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, High School Publ., 2003, 479 p. (In Russian).

10. Sekretarev Y.A., Gorshunov A.A. Certificate of registration of the computer program *RU 2022618655*, 13.05.2022.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Секретарев Юрий Анатольевич

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Маркса пр., д. 20, к. 1, г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы электроснабжения предприятий», НГТУ.

Тел.: +7 (913) 902-70-51.

E-mail: sekretarevua@mail.ru

Горшунов Андрей Андреевич

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Маркса пр., д. 20, к. 1, г. Новосибирск, 630073, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Системы электроснабжения предприятий», НГТУ.

Тел.: +7 (914) 260-17-08.

E-mail: 98sever@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Секретарев, Ю. А. Моделирование технического состояния электрооборудования систем электроснабжения объектов нефтедобывающих предприятий с различными схемами питания / Ю. А. Секретарев, А. А. Горшунов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 3 (55). – С. 120 – 130.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sekretarev Yuri Anatolyevich

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

20, Marx av., 1 b, Novosibirsk, 630073, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, professor of the department «Power Supply Systems of Enterprises», NSTU.

Phone: +7 (913) 902-70-51.

E-mail: sekretarevua@mail.ru

Gorshunov Andrey Andreevich

Novosibirsk State Technical University (NSTU).

20, Marx av., 1 b, Novosibirsk, 630073, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Power Supply Systems of Enterprises», NSTU.

Phone: +7 (914) 260-17-08.

E-mail: 98sever@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sekretarev Y.A., Gorshunov A.A. Modeling of the technical condition of electrical equipment of power supply systems of oil production facilities with various power schemes. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 3 (55), pp. 120-130 (In Russian).

А. С. Макаров, А. А. Кузнецов, Р. В. Сергеев

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИСКРЕНИЯ В СКОЛЬЗЯЩЕМ КОНТАКТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Аннотация. Для контроля степени искрения щеток электрических машин создано множество различных методов, но применяемые сегодня способы регистрации искрения не позволяют проанализировать этот процесс непосредственно в эксплуатации, не внося изменений в конструкцию машины. Статья посвящена исследованию возможности использования акустического метода для регистрации искрения акустической эмиссией, создаваемой искрением в скользящем контакте. Использование метода акустической эмиссии посредством пьезоэлектрических датчиков, размещаемых на корпусе при помощи встроенных магнитов, для определения степени искрения позволит не вмешиваться в конструкцию машины. Пьезоэлектрические датчики, используемые в качестве первичных преобразователей, менее подвержены внешним воздействиям по сравнению с аналогичными решениями, требующими либо наличия прямой видимости источника искрения, либо установки непосредственно на щетку или щеткодержатель. Запись сигналов акустической эмиссии от пьезоэлектрических датчиков при различных режимах работы осуществлялась при помощи системы АЭ СЦАД-16. Для обработки полученных сигналов, предварительно представленных в виде спектра частот, применен однофакторный дисперсионный анализ. Были исследованы также свойства распределения доминантных частот полученных сигналов. Полученные в результате анализа и исследования данные показывают значительные различия сигналов в различных режимах работы. Представлены распределения доминантных частот для каждого режима работы для случаев питания от тиристорного преобразователя и от генератора постоянного тока, а также коэффициенты, описывающие распределения доминантных частот. В результате однофакторного дисперсионного анализа распределения доминантных частот выявлен диапазон частот, амплитуда которых меняется в зависимости от степени искрения. Внедрение этого метода позволит проводить регистрацию искрения, не выводя двигатель из эксплуатации.

Ключевые слова: электродвигатель постоянного тока, степень искрения, коллекторно-щеточный узел, коммутация, акустическая эмиссия, пьезоэлектрический датчик, однофакторный дисперсионный анализ.

Artem S. Makarov, Andrey A. Kuznetsov, Roman V. Sergeev

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

APPLICATION OF THE ACOUSTIC EMISSION METHOD FOR REGISTERING SPARKING IN THE SLIDING CONTACT OF ELECTRIC MACHINES

Abstract. Many different methods have been created to control the degree of sparking of brushes of electric machines, but the methods of sparking registration used today do not allow to analyze this process directly in operation without making changes in the machine design. The article is devoted to the study of the possibility of using the acoustic method to register acoustic emission sparking in the sliding contact. Using the method of acoustic emission by means of piezoelectric sensors placed on the body by using magnets installed in the sensor, to determine the degree of sparking will not interfere with the design of the machine. The piezoelectric sensors used as primary transmitters are less susceptible to external influences than similar solutions that require either a direct line of sight to the source of the sparking or installation directly on the brush or brush holder. Recording of acoustic emission signals from piezoelectric sensors at different modes of operation was carried out with the help of ACAD-16 AE system. Single-factor analysis of variance was applied to process the received signals, which were preliminary represented in the form of a frequency spectrum. The properties of the dominant frequency distribution of the received signals were also investigated. The data obtained as a result of the analysis and study show significant differences between the signals in different modes of operation. The dominant frequency distributions for each mode of operation presented for the cases of thyristor converter and DC generator power supply and the coefficients describing the dominant frequency distributions presented. As a result of one-factor analysis of variance dominant frequency distributions, a range of frequencies whose amplitude varies depending on the degree of sparking is revealed. Implementation of this method will make it possible to register sparking without taking the engine out of operation.

Keywords: DC motor, spark intensity, collector-brush assembly, commutation, acoustic emission, piezoelectric sensor, single-factor dispersion analysis.

Электрические машины постоянного тока получили широкое распространение благодаря хорошим пусковым и регулировочным свойствам. Однако наличие коллекторно-щеточного узла вносит возможность возникновения неисправностей, нехарактерных для иных типов двигателей [1]. В результате щетки подвержены износу, обусловленному механическим трением, электрической коррозией и электрической эрозией, при возникновении искрения под щетками. Степень искрения щеток – один из параметров машины, который используется для определения ее пригодности к работе, что подтверждается полученными зависимостями среднего пробега двигателей от качества коммутации [2, 3].

Используемые в настоящее время методы регистрации и оценки степени искрения щеток, такие как фотоэлектрический метод, метод исследования импульсов напряжения от коммутационной реакции якоря, метод оценки искрения по уровню радиопомех, метод мониторинга, падение напряжения под сбегающим краем щеток, применение бесконтактного преобразователя емкостного типа и др., применимы лишь для испытаний, связанных с выводом машины из эксплуатации и размещением ее на испытательных стендах [3]. Созданные приборы регистрации и оценки степени искрения, устанавливаемые на тяговые двигатели, позволяют только записывать данные, дальнейшая обработка происходит после получения данных оператором посредством непосредственного подключения [4, 5]. Для совершенствования существующих бортовых систем мониторинга предложено применять методы, основанные на фиксации вторичных явлений, возникающих при искрении, таких как световые вспышки и радиоволны [6].

Предлагается использовать ранее не применяемый для регистрации искрения метод акустической эмиссии, вызываемой искрением, которое является дуговым электрическим разрядом. Метод акустической эмиссии (АЭ) позволяет получать в реальном времени информацию о состоянии контролируемого объекта путем регистрации и анализа акустического излучения, сопровождающего процессы перестройки структуры твердого тела, истечения жидких и газообразных сред трения поверхностей [7, 8].

Для подтверждения возможности регистрации степени искрения по изменению сигнала акустической эмиссии было проведено экспериментальное исследование на установке, состоящей из двух машин постоянного тока 2ПБ90МГУЧЛ4, соединенных между собой механически и подключенных к источнику питания 110 В. При этом одна из машин является испытуемой: работает в качестве двигателя (М) и подключена к сети; вторая машина работает в режиме генератора (Г), отдавая вырабатываемую электрическую энергию на нагрузочный реостат. Установка содержит также измерительные приборы, реостатное оборудование, генератор постоянного тока и асинхронный двигатель. Электрическая схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1.

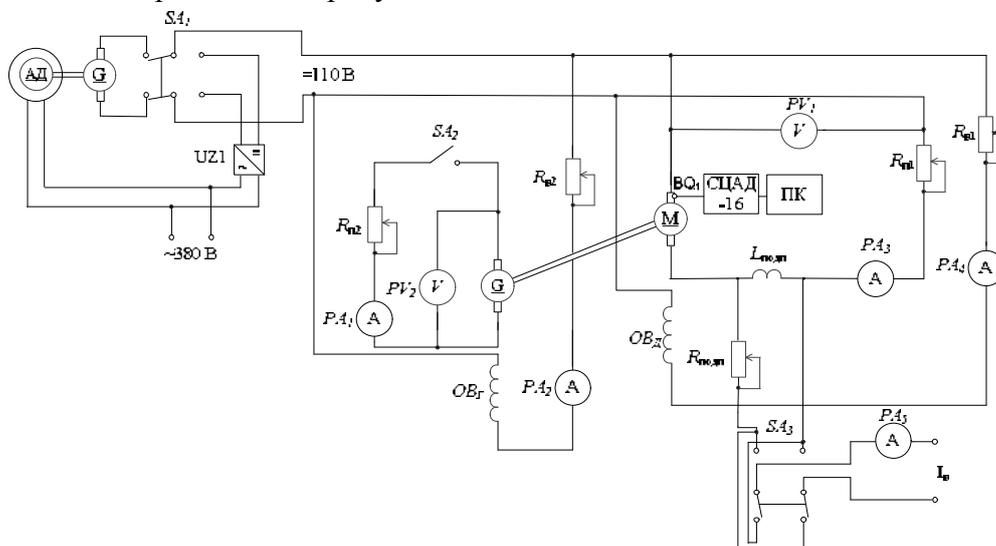


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Для регистрации акустической эмиссии использовалась система АЭ СЦАД-16. Для обслуживания цифровых акустико-эмиссионных систем типа СЦАД используется программа AES51, которая позволяет выполнять сбор и обработку акустических сигналов (на рисунке 2 представлено окно программы).

В канале пьезоэлектрического датчика, установленного в непосредственной близости от искрящих щеток (рисунок 3), системы АЭ СЦАД-16 осуществляется усиление, фильтрация и преобразование сигналов АЭ в цифровой код с дальнейшей обработкой на микропроцессоре [9]. Пьезоэлектрический датчик был размещен так, чтобы путь акустической эмиссии от искрящей щетки до датчика был минимальным и чтобы датчик не соприкасался с токоведущими поверхностями.

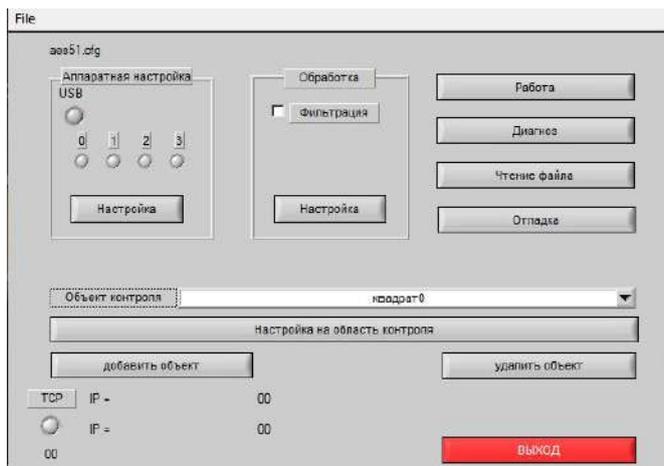


Рисунок 2 – Окно программы AES51



Рисунок 3 – Внешний вид пьезоэлектрического датчика (белый цилиндр в нижней части рисунка), установленного на траверсу

В ходе эксперимента проводились измерения сигнала акустической эмиссии в режимах холостого хода и номинальной нагрузки при степени искрения 1 ¼ балла, 1 ½ балла, 2 и 3 балла. Изменение степени искрения проводилось посредством подпитки дополнительных полюсов, а контроль степени искрения осуществлялся при помощи прибора контроля коммутации [10]. Для каждого режима и степени искрения было записано 50 сигналов продолжительностью 512 мкс. Эксперимент проводился при питании экспериментальной установки от генератора постоянного тока и тиристорного преобразователя.

Полученные в результате измерений сигналы содержат в себе информацию об акустической эмиссии двигателей. Сигналы обрабатывались с помощью спектрального анализа (рисунок 4). Эти данные использовались для получения распределения доминантных частот и проведения однофакторного дисперсионного анализа.

На рисунках 5 – 9 представлены результаты обработки записанных сигналов АЭ для каждого проведенного измерения в программе AES51. Распределение доминантных частот показывает количество наблюдений (по вертикали), в которых частота (по горизонтали) имела наибольшую амплитуду.

Изменения распределения, связанные с изменением степени искрения, наблюдаются в диапазоне частот 400 – 700 кГц. Для подтверждения этого результата был проведен однофакторный дисперсионный анализ, задача которого состоит в проверке гипотезы о равенстве групповых средних значений, т. е. о равенстве средних значений оцениваемой характеристики для каждого участника испытаний. Если различие между этими дисперсиями значимо, то фактор оказывает существенное влияние на исследуемое измерение; в этом случае средние из наблюдаемых значений на каждом уровне различаются также значимо. Если нулевая гипотеза о равенстве средних значений справедлива, то все эти дисперсии являются

несмещенными оценками генеральной дисперсии и фактор не оказывает существенного влияния на изучаемый процесс [11].

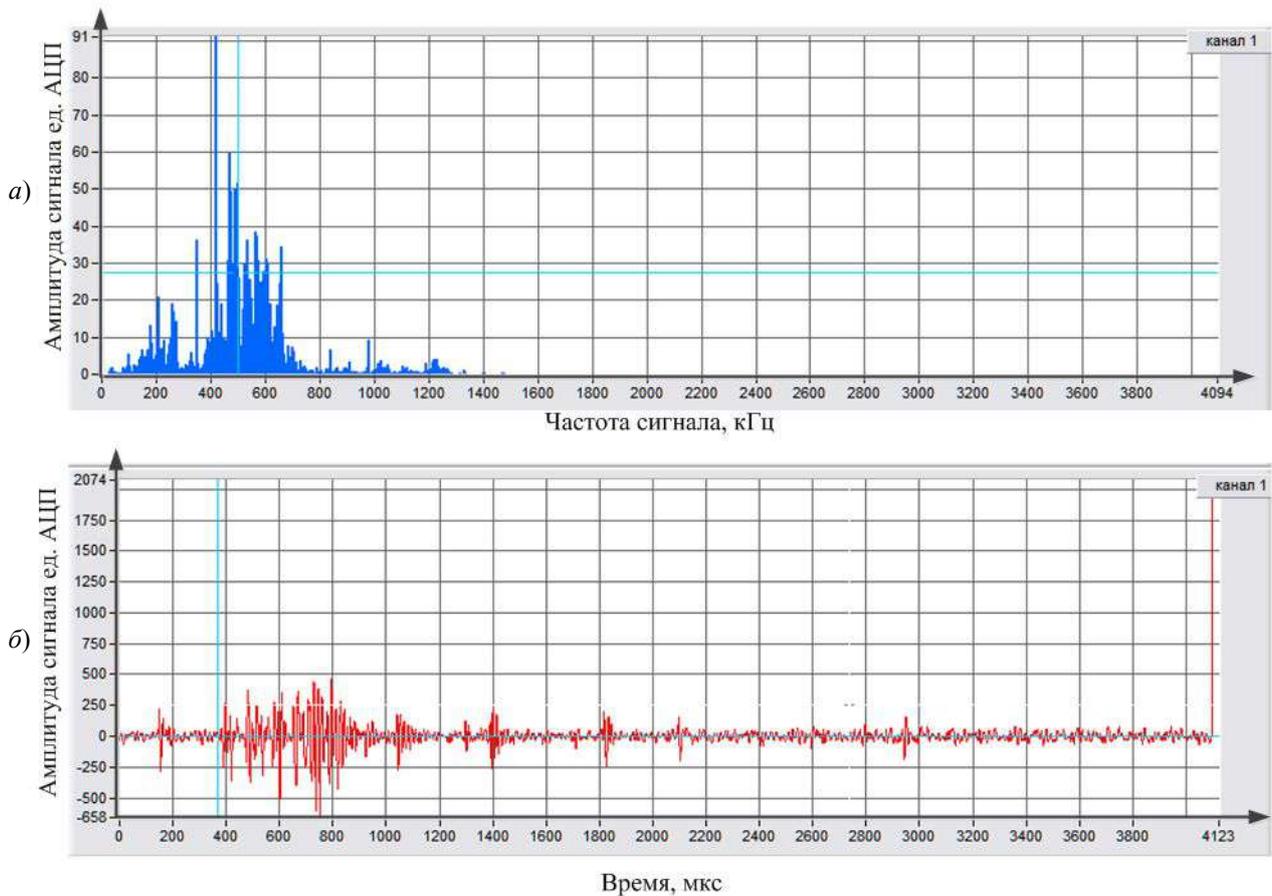


Рисунок 4 – Спектральный анализ сигнала (а) и записанный сигнал (б), питание генератором постоянного тока при степени искрения 3 балла

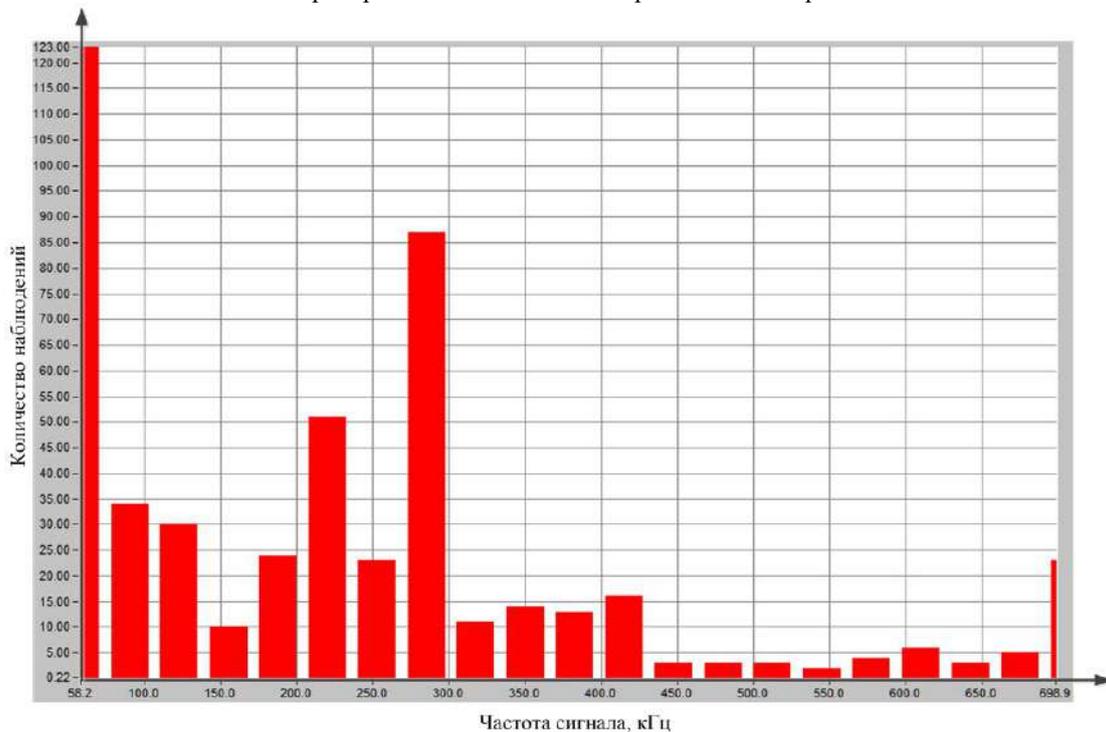


Рисунок 5 – Распределение доминантных частот на холостом ходу при питании машины от генератора постоянного тока

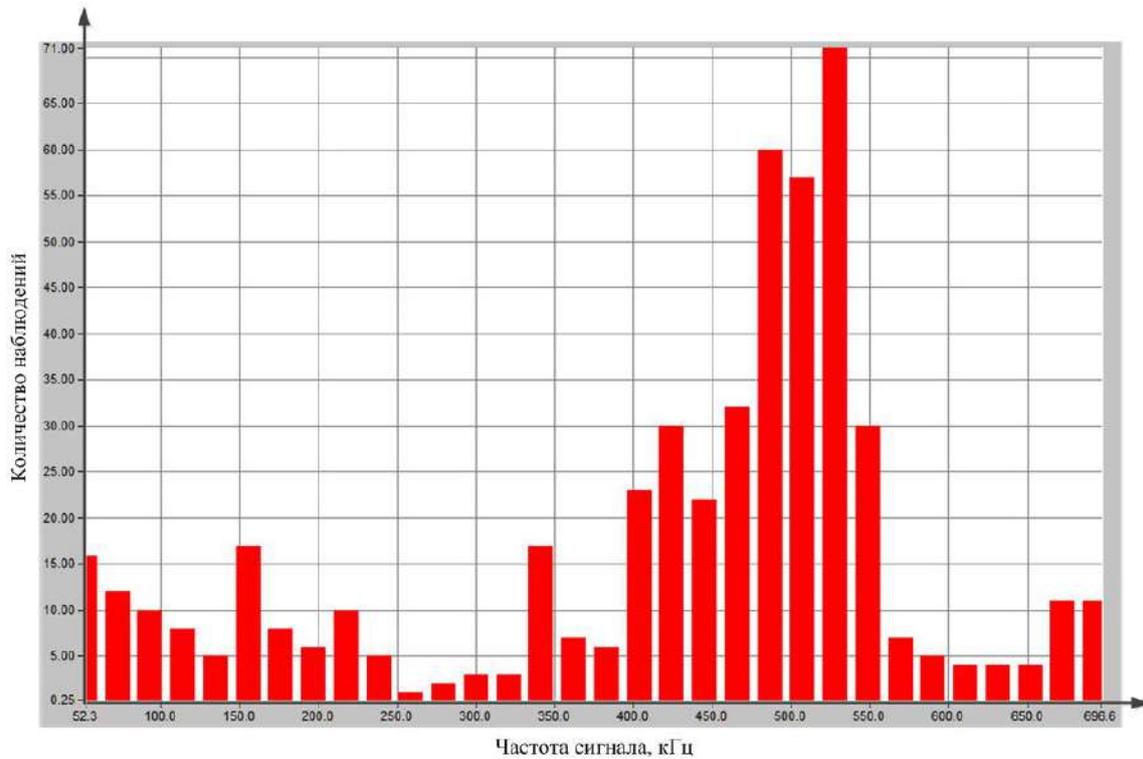


Рисунок 6 – Распределение доминантных частот при искрении 1 ½ балла при питании машины от генератора постоянного тока

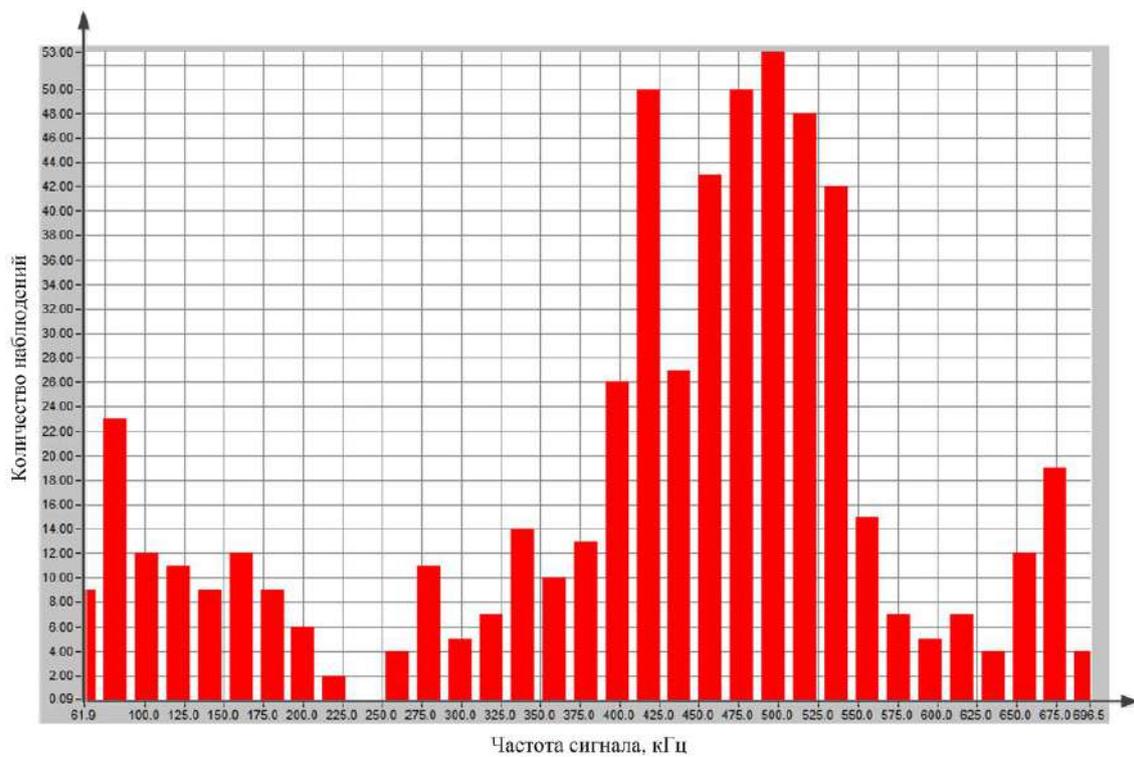


Рисунок 7 – Распределение доминантных частот при искрении 3 балла от генератора постоянного тока

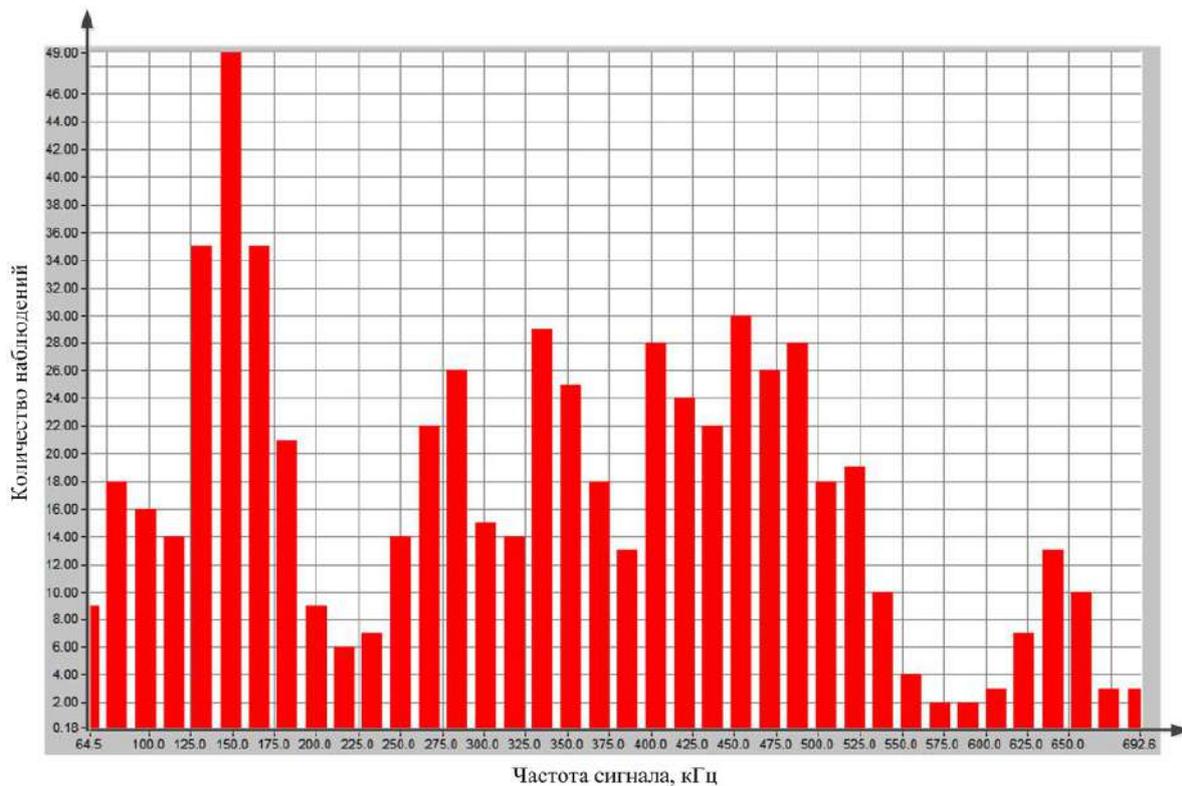


Рисунок 8 – Распределение доминантных частот при искрении 1 ½ балла при питании от тиристорного преобразователя

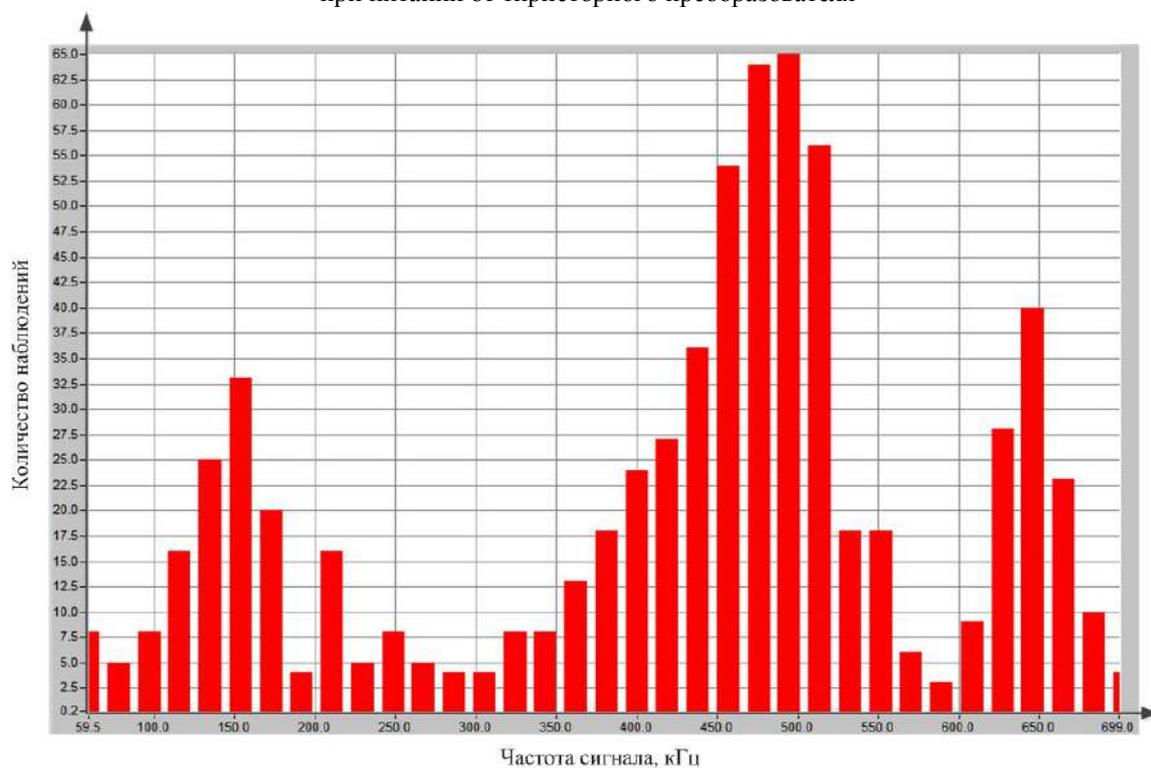


Рисунок 9 – Распределение доминантных частот при искрении 3 балла при питании от тиристорного преобразователя

Результаты испытаний всех режимов работы представляются в виде таблицы, где фактором является режим работы, наблюдаемая величина – амплитуда доминантной частоты;

L_j ($j = 1, \dots, p$) – порядковый номер режима работы; p – общее количество уровней фактора; g – общее количество экспериментальных значений. В данном эксперименте было исследовано шесть режимов работы, соответственно $p = 6$. Для каждого режима работы было записано 50 сигналов, соответственно $g = 50$.

Для оценки равенства групповых средних значений при однофакторном дисперсионном анализе необходимо определить следующее:

общую сумму квадратов отклонений экспериментальных значений от общего среднего значения:

$$S_{\text{общ}} = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^g (x_{ij} - \bar{x})^2, \quad (1)$$

где x_{ij} – измеренное наблюдение; \bar{x} – общее среднее значение;

факторную сумму квадратов отклонений групповых средних значений от общего среднего значения в качестве характеристики разброса значений между измерениями:

$$S_{\text{факт}} = g \sum_{j=1}^p (\bar{x}_{\text{гр}j} - \bar{x})^2, \quad (2)$$

где $\bar{x}_{\text{гр}j}$ – групповое среднее значение;

остаточную сумму квадратов отклонений значений группы (участника) от своих групповых средних значений в качестве характеристики внутригруппового рассеяния:

$$S_{\text{ост}} = \sum_{i=1}^g (x_{i1} - \bar{x}_{\text{гр}1})^2 + \sum_{i=1}^g (x_{i2} - \bar{x}_{\text{гр}2})^2 + \sum_{i=1}^g (x_{ip} - \bar{x}_{\text{гр}p})^2. \quad (3)$$

Для вычисления факторной и остаточной дисперсий факторную и остаточную суммы необходимо разделить на соответствующие числа степеней свободы:

$$S_{\text{факт}}^2 = \frac{S_{\text{факт}}}{p-1}, \quad (4)$$

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{S_{\text{ост}}}{g(p-1)}. \quad (5)$$

Факторная дисперсия – это дисперсия, обусловленная влиянием одного или нескольких контролируемых факторов, остаточная дисперсия – дисперсия, обусловленная влиянием случайных, неконтролируемых факторов.

Далее для проверки принятой гипотезы о равенстве групповых средних значений применяют критерий Фишера, в соответствии с которым наблюдаемое значение определяют по соотношению

$$F_{\text{набл}} = \frac{S_{\text{факт}}^2}{S_{\text{ост}}^2}. \quad (6)$$

Величина $F_{\text{кр}}$ – справочная величина, которая определяется из таблицы критических значений распределения Фишера для заданных числа степеней свободы и уровня значимости. Для каждого режима записано $g = 50$ сигналов, всего режимов $p = 6$, что дает количество степеней свободы $p - 1 = 5$ и $g(p - 1) = 245$. Критическое значение $F_{\text{кр}}$ для степени значимости 0,05 для такого количества степеней свободы равняется 2,24.

В таблице 1 представлены результаты однофакторного дисперсионного анализа при питании экспериментальной установки от генератора постоянного тока и тиристорного преобразователя для диапазонов частот сигналов 20 – 400 кГц и 400 – 700 кГц, регистрируемых системой АЭ СЦАД-16. Отметим, что при питании от тиристорного преобразователя в сигнале АЭ в диапазоне 580 – 700 кГц наблюдается второй пик частот, обрывающийся на границе чувствительности прибора. Для оценки достаточности одного пика частот был проведен однофакторный дисперсионный анализ для диапазона 400 – 580 кГц. В качестве фактора рассмотрен режим работы двигателя, в том числе и при различных степенях искрения. В качестве наблюдаемой величины, или признака X , взяты амплитуды доминантных гармоник.

Таблица 1 – Результаты однофакторного дисперсионного анализа сигналов АЭ при различном питании двигателя экспериментальной установки

Диапазон частот, кГц	Питание от генератора постоянного тока		Питание от тиристорного преобразователя		
	20 – 400	400 – 700	20 – 400	400 – 700	400 – 580
$S_{\text{факт}}$	183094,49	171562,52	23722,68	67406,01	67640,03
$S_{\text{ост}}$	2452177,41	1031627,98	900680,48	504525,53	498182,70
$S_{\text{общ}}$	2635271,90	1203190,50	924403,17	571931,54	560890,58
$S_{\text{факт}}^2$	36618,90	34312,50	3072,64	13481,20	13528,01
$S_{\text{ост}}^2$	8340,74	3508,94	3009,30	1716,07	1694,50
$F_{\text{набл}}$	4,39	9,78	1,55	7,86	7,98

Таким образом, в трех диапазонах при питании от генератора постоянного тока и в диапазонах 400 – 700 кГц и 400 – 580 кГц при питании от тиристорного преобразователя наблюдаемое значение критерия Фишера $F_{\text{набл}} > F_{\text{кр}}$, значит, нулевая гипотеза о равенстве средних значений отвергается, т. е. имеется связь между изменением степени искрения и изменением сигнала АЭ.

Для диапазона 20 – 400 кГц при питании от тиристорного преобразователя $F_{\text{набл}} < F_{\text{кр}}$, что говорит о справедливости нулевой гипотезы и о том, что фактор не оказывает существенного влияния.

Был проведен анализ распределения доминантных частот для определения асимметричности (таблица 2) и остроты пика (таблица 3) распределений для различных значений степени искрения. Для питания от тиристорного преобразователя рассматривался промежуток 400 – 580 кГц, а для питания от генератора постоянного тока – 400 – 700 кГц.

Таблица 2 – Коэффициент асимметрии для распределения доминантных частот при различной степени искрения

Тип питания	Режим работы					
	холостой ход	номинальный режим	1 ¼ балла	1 ½ балла	2 балла	3 балла
Питание от генератора постоянного тока	2,886	0,313	2,037	1,079	1,004	0,281
Питание от тиристорного преобразователя	3,803	2,343	1,268	0,792	0,496	0,381

Таблица 3 – Коэффициент эксцесса (острота пика) для распределения доминантных частот при различной степени искрения

Тип питания	Режим работы					
	холостой ход	номинальный режим	1 ¼ балла	1 ½ балла	2 балла	3 балла
Питание от генератора постоянного тока	8,112	-0,739	4,689	0,201	-0,076	-1,428
Питание от тиристорного преобразователя	19,774	5,901	2,869	0,907	-0,548	-1,177

Анализ показывает, что при повышении степени искрения увеличивается симметрия распределения доминантных частот на исследуемых промежутках для обоих типов питания. Наблюдается также изменение остроты пика: с изменением степени искрения распределение плавно переходит от ярко выраженного пика с тяжелыми хвостами к распределению с плоской вершиной, близко подходя к форме нормального распределения для 1 ½ и 2 баллов, но при этом 1 ½ балла имеет положительный эксцесс, а 2 балла – отрицательный.

Проведенное исследование продемонстрировало возможность регистрации искрения на скользящем контакте электрических машин методом акустической эмиссии. Результаты однофакторного дисперсионного анализа частот подтверждают возможность регистрировать изменения степени искрения по изменению сигнала АЭ в диапазоне 400 – 700 кГц. При питании от тиристорного преобразователя в сигнале АЭ в диапазоне 580 – 700 кГц наблюдается второй пик частот, обрывающийся на границе чувствительности прибора, при использовании этого метода необходимо учитывать указанное явление, сокращая контролируемый диапазон. Уменьшение диапазона не оказывает значительного эффекта на результат однофакторного дисперсионного анализа, что говорит о значительном различии сигналов АЭ при различных режимах работы. Для сопоставления записанного сигнала искрения с системой баллов степеней искрения для обоих рассмотренных типов питания подходит анализ форм распределений доминантных частот, показавший характерные различия сигналов с разной степенью искрения.

Список литературы

1. Авилов, В. Д. К вопросу о повышении коммутационной устойчивости коллекторных машин постоянного тока / В. Д. Авилов, П. Г. Петров, Е. М. Моисеенок – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2010. – № 2 (2). – С. 2–6.
2. Миронов, А. А. Синхронные методы диагностирования состояния коммутации коллекторных электрических машин / А. А. Миронов, Р. Х. Сайфутдинов. – Текст : непосредственный // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : сборник материалов конференции / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2013. – Том 1. – С. 46–50.
3. Харламов, В. В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока : монография / В. В. Харламов. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2002. – 233 с. – Текст : непосредственный.
4. Патент на полезную модель № 206379 U1 Российская Федерация, МПК H02K 11/20, G01R 31/34. Устройство регистрации интенсивности искрения тяговых двигателей в условиях эксплуатации : № 2021101748 : заявлено 26.01.2021 : опубликовано 08.09.2021 / Харламов В. В., Москалев Ю. В., Попов Д. И., Найден С. Н. – 7 с.: 1 ил. – Текст : непосредственный.
5. Осадченко, А. А. Мониторинг искрения тяговых электрических машин постоянного тока : специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Осадченко Александр Александрович. – Томск, 2010. – 19 с. – <https://www.rsl.ru/> : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003491609?page=1&rotate=0&theme=white> (дата обращения: 30.03.2023).
6. Макаров, А. С. Исследование эффективности диагностирования тяговых электродвигателей электровозов серии ЭС5К / А. С. Макаров, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы XVII научной конференции, посвященной Дню российской науки, Омск, 08 февраля 2023 года. – Текст : непосредственный. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 357–363.
7. Основы диагностики технических устройств и сооружений / Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев, Н. А. Быстрова, Д. И. Галкин. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – 445 с. – Текст : непосредственный.
8. ГОСТ Р 52727–2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования. – Москва : Стандартинформ, 2007. – 16 с. – Текст : непосредственный.
9. 78816-20. Системы цифровые акустико-эмиссионные диагностические СЦАД-16.02 и СЦАД-16.03 // Федеральная государственная информационная система Росстандарта. – Текст : электронный. – URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/1380731> (дата обращения: 28.01.2023).

10. Шкодун, П. К. Разработка мобильного устройства для оценки качества коммутации тяговых электродвигателей подвижного состава / П. К. Шкодун. – Текст : непосредственный // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Омск, 18 ноября 2022 года. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2022. – С. 262–269.

11. Подживотов, Н. Ю. Оценка результатов испытаний с помощью однофакторного дисперсионного анализа / Н. Ю. Подживотов. – Текст : непосредственный // Труды ВИАМ. – 2022. – № 8 (114). – С. 141–152.

References

1. Avilov V.D., Petrov P.G., Moiseenok E.M. Increasing of switching stability on DC machines. *Izvestiia Transsiba – The Journal of Transsib Railway Studies*, 2010, no. 2 (2), pp. 2-6 (In Russian).

2. Mironov A.A., Sayfutdinov R.H. [Synchronous methods for diagnosing the state of switching of collector electric machines]. *Nauchno-tehnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke: sbornik materialov konferentsii* [Scientifically technical and economical cooperation in Asia-Pacific countries in the 21st century: proceedings of the conference]. Khabarovsk, 2013, vol. 1, pp. 46-50 (In Russian).

3. Kharlamov V.V. *Metody i sredstva diagnostirovaniya tehničeskogo sostojaniya kollektorno-shhetochnogo uzla tjagovykh jelektrodvigatelej i drugih kollektornykh mashin postojannogo toka: monografiia* [Methods and means of diagnosing the technical condition of the collector-brush assembly of traction electric motors and other DC collector machines: monograph]. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2002, 233 p. (In Russian).

4. Kharlamov V.V., Moskalev Yu.V., Popov D.I., Naiden S.N. *Patent RU, 206379 U1*, 26.01.2021.

5. Osadchenko A.A. *Monitoring iskrenija tjagovykh jelektricheskikh mashin postojannogo toka* (Monitoring of sparking of DC traction electric machines). Doctor's thesis abstract, Tomsk, TPU, 2010, 19 p. Available at: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003491609?page=1&rotate=0&theme=white> (accessed 30.03.2023) (In Russian).

6. Makarov A.S., Popov D.I., Baysadykov M.F. [Investigation of the effectiveness of diagnosing traction electric motors of electric locomotives of the ES5K series]. *Innovacionnye proekty i tehnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauchnoj konferencii* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport: scientific conference materials]. Omsk, 2023, pp. 357-363 (In Russian).

7. Bigus G.A., Daniev Yu.F., Bystrova N.A., Galkin D.I. *Osnovy diagnostiki tehničeskikh ustrojstv i sooruzhenij* [Fundamentals of diagnostics of technical devices and structures]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2018, 445 p. (In Russian).

8. National Standard 52727–2007. Technical diagnostics. Acoustic emission diagnostics. General requirements. Moscow, Standartinform Publ., 2007, 16 p. (In Russian).

9. 78816-20. *Sistemy cifrovye akustiko-jemissionnye diagnosticheskie SCAD-16.02 i SCAD-16.03 // Federal'naja gosudarstvennaja informacionnaja sistema Rosstandarta* [78816-20 Digital acoustic emission diagnostic systems SCAD-16.02 and SCAD-16.03 // Federal State Information System of Rosstandart]. Available at: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/1380731> (accessed 28.01.2023).

10. Shkodun P.K. [Development of a mobile device for assessing the quality of commutation of traction electric motors of rolling stock]. *Ekspluatacionnaja nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tjagi poezdov: materialy vsersijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* [Operational reliability of the locomotive fleet and improving the efficiency of train traction: materials of the All-Russian scientific and technical conference with international participation]. Omsk, 2022, pp. 262-269 (In Russian).

11. Podzhivotov N.Y. Assessment of results by means of the analysis of variance method. *Trudy VIAM – Proceedings of VIAM*, 2022, no. 8 (114), pp. 141-152 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Макаров Артем Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: martyom1597@mail.ru

Кузнецов Андрей Альбертович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (904) 321-50-90.

E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Сергеев Роман Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, проректор по молодежной политике и социальным вопросам, ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Макаров, А. С. Применение метода акустической эмиссии для регистрации искрения в скользящем контакте электрических машин / А. С. Макаров, А. А. Кузнецов, Р. В. Сергеев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 3 (55). – С. 131 – 141.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Makarov Artem Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: martyom1597@mail.ru

Kuznetsov Andrey Albertovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, head of the department «Theoretical electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (904) 321-50-90.

E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Sergeev Roman Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor, vice-rector for youth policy and social issues, OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Makarov A.S., Kuznetsov A.A., Sergeev, R.V. Application of the acoustic emission method for registering sparking in the sliding contact of electric machines. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 3 (55), pp. 131-141 (In Russian).

УДК 656.025.4

Д. А. Корнев

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), г. Москва, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ

Аннотация. Проанализирована структура системы управления движением поездов на сети железных дорог. Показано, что при существующих цифровых системах управления движением на участках, оборудованных диспетчерской централизацией, можно внедрить адаптивную систему управления локомотивами. Эта система позволит в условиях неопределенности внешних факторов выбирать алгоритм управления локомотивом, максимально удовлетворяющий заданным критериям оптимизации. Внедрение адаптивного алгоритма управления требует разворачивания на сервере диспетчерской централизации

виртуального вычислительного комплекса, которому будут переданы функции расчета параметров рационального режима движения локомотива. Обосновано, что прямое взаимодействие системы автоведения локомотива и виртуального вычислительного комплекса на сервере диспетчерской централизации требует защиты маршрутов передачи информации высокого уровня. Показано, что в условиях повышенных требований к безопасности движения на сети железных дорог (ж. д.) наиболее тяжелые последствия может иметь информационная атака проникновения третьего лица в каналы связи между виртуальным вычислительным комплексом и системой автоведения локомотива. Это может привести к изменению алгоритма управления локомотивом и спровоцировать аварию.

С целью определения надежности работы системы предложена модель функционирования адаптивной системы управления локомотивом в математическом аппарате сетей Петри. Модель позволяет рассчитывать вероятность доступа к каналам передачи информации третьих лиц. Приведен пример моделирования динамического процесса передачи информации между виртуальным вычислительным комплексом и системой автоведения локомотива. Показано, что при возникновении нарушения в процессе передачи информации ее дискредитация может остаться незамеченной. Приведена диаграмма функционирования вычислительного ресурса и возникновения нарушений в процессе передачи информации в масштабе текущего времени. При заданных параметрах передаваемой информации использование данной модели в общей модели функционирования участка железной дороги позволит рассчитать риска внедрения адаптивного алгоритма управления движением поездов.

Приведены результаты расчета надежности работы каналов передачи информации в адаптивной системе управления движением поездов. Показано, что наиболее эффективной мерой обеспечения надежности передачи легитимной информации является контроль работы хоста виртуального вычислительного комплекса.

Ключевые слова: цифровая автоматизированная система адаптивного управления движением поездов, информационная модель, методы моделирования в терминах сетей Петри, надежности работы каналов передачи информации.

Dmitry A. Kornev

Research and Design Institute for Information Technology, Signaling and Tele-communications on Railway Transport
(JSC NIIAS), Moscow, the Russian Federation

SIMULATION OF DATA TRANSMISSION NETWORKS IN INTELLIGENT TRAIN CONTROL SYSTEM

Abstract. The structure of the train traffic control system on the railway network is analyzed. It is shown that with the existing digital traffic control systems in areas equipped with dispatcher centralization, it is possible to introduce an adaptive locomotive control system. This system will allow, under the conditions of uncertainty of external factors, to choose a locomotive control algorithm that best satisfies the specified optimization criteria. The introduction of an adaptive control algorithm requires the deployment of a virtual computer complex on the server of centralization dispatcher, which will be transferred to the functions of calculating the parameters of the rational mode of movement of the locomotive.

It is substantiated that the direct interaction of the locomotive adaptive guidance system and the virtual computing complex on the dispatcher centralization server requires the protection of information transmission routes of high-level. It is shown that under conditions of increased requirements for traffic safety on the railway network the most severe consequences can be caused by an information attack by a third party on the communication channels between the virtual computing complex and the locomotive's auto driving system. This can lead to a change in the locomotive control algorithm and cause an accident.

In order to determine the reliability of the system operation, a model for the functioning of an adaptive locomotive control system in the mathematical apparatus of Petri networks is proposed. The model makes it possible to calculate the probability of access to information transmission channels by third parties. An example of modeling the dynamic process of information transfer between a virtual computer system and a locomotive auto-guidance system is given. It is shown that if a violation occurs in the process of transmitting information, its discrediting may go unnoticed. A diagram of the functioning of the computing resource and the occurrence of violations in the process of information transmission on the scale of current time is given. Given the parameters of the transmitted information, the use of this model in the general model of the functioning of the railway section will allow us to calculate the risk of introducing an adaptive algorithm for controlling the movement of trains.

The results of calculating the reliability of the operation of information transmission channels in an adaptive train traffic control system are presented. It is shown that the most effective measure to ensure the reliability of the transmission of legitimate information is to control the operation of the host of the virtual computing complex.

Keywords: digital automated system for adaptive train traffic control, information model, modeling methods in terms of Petri nets, reliability of information transmission channels.

Обеспечение стабильного функционирования участка ж. д. и управление поездной ситуацией осуществляет цифровая система диспетчерской централизации (ДЦ), которая имеет связь с линейными пунктами (ЛП) и позволяет контролировать график движения, а также выдает рекомендации диспетчеру при отклонении поездной ситуации от установленного графика.

На участках с интенсивным движением поездов на ж. д. России используются преимущественно пакетный или частично-пакетный графики движения. При этом подчас возникает производственная необходимость пропуска поездов вне графика.

Наряду с устройствами ДЦ цифровые технологии используются и на подвижном составе. В настоящее время системы автоведения активно внедряются на электровозах ЧС7, тепловозах 2ТЭ116, электропоездах «Ласточка» и др. Это открывает новые перспективы взаимодействия ДЦ с системой автоведения локомотива с точки зрения выбора метода эффективной организации и информационного обеспечения автоматизированной системы управления (АСУ) движением поездов.

Структура задачи управления локомотивом с учетом требований к характеристикам движения в условиях текущей поездной ситуации, взаимодействия работы всех агрегатов и систем, ограничений на их допустимые нагрузки и т. д. требует значительных объемов вычислительных ресурсов. Кроме того, необходимо учитывать, что сам локомотив с точки зрения управления является объектом с запаздыванием, поскольку обладает значительной инерцией. Наличие запаздывания требует решения дополнительной задачи – обеспечения устойчивости работы объекта за счет прогнозирования состояния системы при неопределенных значениях возмущений или компенсации запаздывания в используемом алгоритме управления. Применение последнего метода сопровождается значительными трудностями, поскольку локомотив является сложным электромеханическим объектом, агрегаты которого находятся в постоянном взаимодействии и имеют механические, электрические и тепловые постоянные времени, отличающиеся друг от друга во много раз. Поэтому в настоящее время реализуемым решением является разработка прогнозных алгоритмов управления локомотивами.

В работе [1] предложен метод управления объектом с запаздыванием и параметрической неопределенностью с использованием механизма адаптации [2]. В этом случае для объекта, параметры которого меняются во времени, разрабатывается максимально возможное число алгоритмов управления с возможностью их регуляризации путем использования в процедуре их адаптации отрицательных обратных связей и допустимых значений зон нечувствительности на изменение управляемых величин. Поскольку управление с адаптацией предусматривает изменение алгоритма по мере накопления информации, его можно отнести к интеллектуальным или самообучающимся системам [3].

Самообучающиеся алгоритмы управления требуют использования вычислительных ресурсов с большим объемом оперативной памяти и высокого быстродействия. Одним из путей повышения эффективности использования мощности сервера является применение технологии виртуализации [4 – 6].

1. Структура системы управления локомотивами. Большое число разноплановых задач, которые необходимо решать при управлении движением поезда в каждый текущий момент времени, обосновывает целесообразность размещения на главном сервере пункта диспетчерской централизации хоста с развернутыми на нем виртуальными вычислительными машинами – виртуального вычислительного комплекса (ВВК) [7]. Преимуществом этого решения является тот факт, что решение каждой задачи адаптивного управления локомотивом осуществляет выделенный сегмент сервера – виртуальная вычислительная машина (ВМ) с возможностью обмена информацией с другими ВМ. Обобщение прогнозов на управление в условиях параметрической неопределенности, полученных от каждой ВМ, позволяет выработать рациональное управление по заданным критериям. Очевидно, что объем решаемой задачи, учитывая, что на линейном участке могут находиться несколько поездов, требует

Блок ВВК является промежуточным звеном между сервером ДЦ и системой автоведения локомотива. На него в режиме реального времени по каналам управления ТУ и контроля ТС должна передаваться оперативная информация о поездной ситуации и режимах работы энергетического оборудования локомотива и его диагностических систем. Каналом передачи информации от локомотива на AIR ВК может служить сеть GSM (блок мобильной связи БМС), а от сервера ДЦ – локальная сеть ETHERNET.

Формирование сигналов управления агрегатами локомотива осуществляется в модуле коммутации и сопряжения (МКС). Модуль МКС, взаимодействуя с процессором штатной микропроцессорной системы управления локомотива ВКЛ, формирует уставку по мощности и передает в общую шину данных информацию дискретных и аналоговых сигналах о нагрузках энергетических агрегатов, состоянии тормозной системы, цепей управления и регулирования, сигнализации локомотива. В свою очередь микропроцессорная система локомотива в режиме текущего времени контролирует значения режимов работы энергетического оборудования и вспомогательных систем, его надежность посредством блока измерения высоковольтного модульного (БИВМа), блока ввода аналоговых сигналов (БАВа), блока измерения диагностического (БИДа) и передает информацию в ВВК.

В распределенной CAN-сети локомотива блок БС является шлюзом для передачи информации от блоков управления и комплексного локомотивного устройства безопасности КЛУБ-У, где фиксируется информация от системы автоматической локомотивной сигнализации (АЛС). С учетом требований к безопасности движения управление пневматической системой торможения локомотива должно быть представлено независимым каналом с пневмодулом (ПМ).

2. Анализ возможности дестабилизации каналов передачи данных системы управления движением поездов. При описанной выше структуре системы управления необходима организация устойчивых и защищенных каналов связи между сервером ДЦ, развернутым на нем ВВК и локомотивом [10].

Применительно к цифровым системам управления движением на сети ж. д. основной задачей является отыскание метода, наиболее эффективно обеспечивающего надежность функционирования каналов передачи данных с учетом возможности целенаправленных попыток их дестабилизации или модификации третьими лицами.

Первым возможным вариантом дестабилизации системы является прекращение передачи данных по сети из-за ее физического повреждения, возникновения электромагнитных помех или чрезмерной загрузки трафиком, спровоцированным третьими лицами. Однако такая ситуация не является критичной для управления движением поездов, так как при потере связи системы автоведения локомотива с ВВК машинист может перейти на работу независимой штатной микропроцессорной системы управления или вообще использовать ручное управление и продолжать движения по сигналам напольного оборудования (системы АЛС).

Вторым возможным сценарием нарушения функционирования системы является модификация алгоритмов маршрутизации, приводящая к перенаправлению трафика внутри сети «ДЦ – ВВК – система автоведения локомотива». В этом случае машинист скорее всего не определит нарушение алгоритма управления, а локомотив будет продолжать работу, подчиняясь «аварийным» командам управления. Этот сценарий может привести как к отказу работы систем локомотива, сбоям в графике движения, так и к тяжелым авариям на участке ж. д. Поэтому при применении на сети ж. д. предлагаемой цифровой системы адаптивного управления поездами необходимо выполнить моделирование модификации алгоритма маршрутизации передаваемой информации, а именно вариант нарушения функционирования сети «ДЦ – ВВК – система автоведения локомотива».

3. Математическая модель функционирования каналов передачи данных и их возможной модификации. Для выбора эффективных средств обеспечения стабильного и надежного функционирования информационного ресурса, а также каналов передачи информации объекту управления, в качестве которого выступает локомотив, разработана

цифровая модель, позволяющая протестировать предлагаемую систему с точки зрения возможности изменения алгоритмов маршрутизации, приводящей к перенаправлению потока трафика через сторонние узлы, потенциально способные вызвать сбои в работе системы. Поскольку информация в любом ресурсе передается дискретными асинхронными пакетами, для создания динамической модели ресурса использовался язык цветных сетей Петри [11].

В сетях Петри текущее состояние ресурса сети «ДЦ – ВВК – система автоведения локомотива» представляется множествами переходов T_k и позиций P_i (рисунок 2) [12, 13]:

$$P = \{p_1, p_2, p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}, p_{15}, p_{20}, p_{21}, p_{30}, p_{31}, p_{40}, p_{41}\};$$

$$T = \left\{ \begin{array}{l} t_{10}, t_{20}, t_{40}, t_{50}, t_{100}, t_{110}, t_{120}, t_{130}, t_{140}, t_{150}, t_{160}, t_{170}, t_{180}, t_{190}, \\ t_{510}, t_{520}, t_{530}, t_{540} \end{array} \right\},$$

где текущее состояние объекта p_i (сеть «ДЦ – ВВК – система автоведения локомотива») представляется непустым конечным множеством позиций

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n\},$$

а изменение состояния объекта t_j определяется непустым конечным множеством переходов

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_m\}.$$

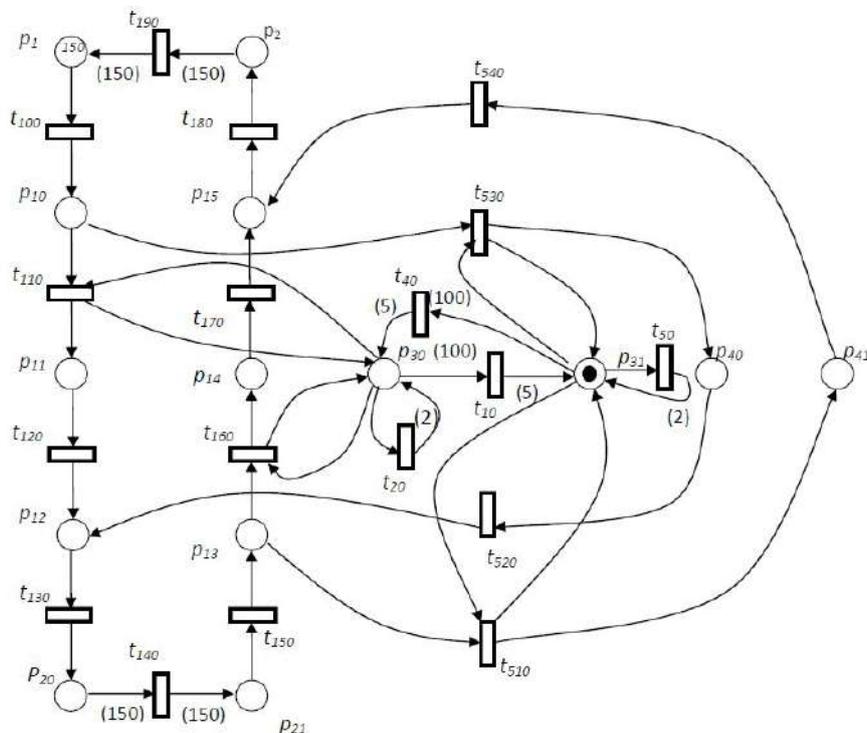


Рисунок 2 – Модель средств маршрутизации информации в сети «ДЦ – ВВК – система автоведения локомотива» при нарушении конфиденциальности на языке сетей Петри

Каждый переход характеризуется множествами входных $I(t_j)$ и выходных дуг $O(t_j)$.

Переход t_j объекта из состояния p_i в состояние p_{i+1} определяется маркером $\mu(p_i)$, где $\mu(p_i) \geq \#(p_i, I(t_j)) \quad \forall p_i \in P$.

В соответствии с математическим аппаратом сетей Петри переход t_j разрешен, если позиция p_i имеет разметку, не меньшую, чем кратность дуги, соединяющей p_i и t_j .

В результате перехода объект оказывается в новом состоянии p_{i+1} и приобретает новую маркировку μ' :

$$\mu'(p_i) = \mu(p_i) - \#(p_i, I(t_j)) + \#(p_i, O(t_j)), \tag{1}$$

где $\{t_j | p_i \in O(t_j)\}$ – множество переходов, для которых p_i является выходом.

Моделью описывается продвижение трафика по легитимным каналам связи от передающего буфера p_1 (система автоведения локомотива) к принимающему буферу p_{20} (ВВК – ДЦ) и обратно, соответственно от буфера p_{21} (ВВК – ДЦ) к буферу p_2 (система автоведения локомотива) (см. рисунок 2). При этом на переходах t_j происходят следующие процедуры: упаковка информации (t_{100}, t_{150}), передача информации ($t_{110}, t_{120}, t_{160}, t_{170}$), распаковка информации (t_{130}, t_{180}).

В фиксированный момент времени легитимные каналы связи между буферами обмена информацией становятся доступными третьему лицу – происходит событие, воздействующее на средства маршрутизации и закрывающее переходы t_{110}, t_{120} и активирующее переход t_{10} . В результате маркировка сети меняется переходом маркера по позициям из $p_{30} \rightarrow p_{31}$, что приводит к открытию переходов t_{510}, t_{530} . Срабатывание переходов t_{510}, t_{530} открывает позиции p_{10}, p_{40}, p_{12} , что моделирует передачу информации через сторонние устройства – позиция p_{40} . Этот переход отражает процесс блокировки прямой передачи информации между системой автоведения локомотива и серверами ДЦ – ВВК.

Срабатывание переходов t_{520}, t_{540} отражает процесс изменения канала обратной маршрутизации трафика от систем ДЦ – ВВК к системе автоведения локомотива, а открытие позиций p_{13}, p_{41}, p_{15} эквивалентно перенаправлению трафика через стороннее устройство (позиция p_{41}).

Таким образом, изменение маркировки в позициях математической модели и соответственно активности ее переходов отображает изменения в алгоритмах маршрутизации трафика между системой автоведения локомотива и серверами ДЦ – ВВК, приводящие к модификации маршрутов трафика и возможному получению к нему доступа третьими лицами.

Впоследствии исходная маршрутизация трафика может быть восстановлена, при этом активизируется переход t_{50} , перемещая маркеры из позиции p_{31} обратно в p_{30} . Маркировка позиции p_{31} становится меньше кратности входных дуг переходов t_{510}, t_{530} , блокируя этот переход. Маркеры, перешедшие $p_{31} \rightarrow p_{30}$, позволяют открыть переходы t_{110}, t_{160} , что в модели отображает восстановление легитимной маршрутизации трафика после завершения восстановления исходных алгоритмов маршрутизации.

Управление системой во время нештатного функционирования осуществляется переходами t_{20}, t_{40} . Переход t_{20} замыкается на вход собственной позиции p_{30} . Входная дуга p_{30} имеет кратность 1, а выходная – кратность 2. Активизация позиции p_{30} ведет к увеличению его маркировки, что необходимо для срабатывания перехода t_{10} , который имеет входную дугу кратностью 100 (кратность дуги t_{10} задавалась исходя из условного времени нарушения работы канала).

Аналогично переход t_{50} замыкается на вход позиции p_{31} ; его входная дуга имеет кратность 1, а выходная – кратность 2. Активизация p_{31} увеличивает его маркировку, в результате чего открывается переход t_{40} с входной дугой кратностью 100. Разница в кратности дуг переходов $t_{20} - t_{40}$ и $t_{40} - t_{50}$ определяет в модели процесс передачи пакета информации за время τ при моделировании нештатного функционирования системы.

Представленный алгоритм функционирования маршрутов передачи данных в структуре «ДЦ – ВВК – система автоведения локомотива» в терминах сетей Петри описывается системой логических уравнений (2).

4. Результаты моделирования нештатного изменения алгоритмов маршрутизации в системе управления движением поездов. Процесс нештатного изменения алгоритмов маршрутизации трафика между ресурсом ДЦ – ВВК и системой автоведения локомотива в соответствии с уравнениями (2) представляется в виде диаграммы, отражающей изменение состояний позиций во времени (рисунок 3).

При нормальной работе системы трафик передается пакетами по легитимным каналам на интервале Δt_c . При передаче трафика от системы автоведения локомотива к ВВК – ДЦ по каналу, представленному позициями $p_1 \rightarrow p_{11} \rightarrow p_{20}$, объем информации уменьшается в

позиции p_1 и увеличивается в позиции p_{20} . При передаче трафика от системы ДЦ – ВВК к системе автоведения локомотива по каналу, соответствующему позициям $p_{21} \rightarrow p_{14} \rightarrow p_2$, объем информации уменьшается в p_{21} и увеличивается в p_2 .

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \mu'(p_1) = \mu(p_1) + 150(\#(p_1, O(t_{190})) = 150) - 1(\#(p_1, I(t_{100})) = 1) ; \\
 \qquad \qquad \qquad t_{100}: \mu(p_1) \geq \qquad \qquad \qquad (p_1, I(t_{100})) ; \\
 \mu'(p_{10}) = \mu(p_{10}) + 1(\#(p_{10}, O(t_{100})) = 1) - 1(\#(p_{10}, I(t_{110})) = 1) \\
 \qquad \qquad \qquad - 1(\#(p_{10}, I(t_{530})) = 1) ; \\
 \qquad \qquad \qquad t_{110}: \mu(p_{10}) \geq \qquad \qquad \qquad (p_{10}, I(t_{110})) \text{ и } \mu(p_{30}) \geq (p_{30}, I(t_{110})) ; \\
 \mu'(p_{11}) = \mu(p_{11}) + 1(\#(p_{11}, O(t_{110})) = 1) - 1(\#(p_{11}, I(t_{120})) = 1) ; \\
 \qquad \qquad \qquad t_{120}: \mu(p_{11}) \geq \qquad \qquad \qquad (p_{11}, I(t_{120})) ; \\
 \mu'(p_{12}) = \mu(p_{12}) + 1(\#(p_{12}, O(t_{120})) = 1) + 1(\#(p_{12}, O(t_{520})) = 1) \\
 \qquad \qquad \qquad - 1(\#(p_{12}, I(t_{130})) = 1) ; \\
 \qquad \qquad \qquad t_{130}: \mu(p_{12}) \geq \qquad \qquad \qquad (p_{12}, I(t_{130})) ; \\
 \mu'(p_{20}) = \mu(p_{20}) + 1(\#(p_{20}, O(t_{130})) = 1) - 150(\#(p_{20}, I(t_{140})) = 1) ; \\
 \qquad \qquad \qquad t_{140}: \mu(p_{20}) \geq \qquad \qquad \qquad (p_{20}, I(t_{140})) ; \\
 \mu'(p_{21}) = \mu(p_{21}) + 150(\#(p_{21}, O(t_{140})) = 150) - 1(\#(p_{21}, I(t_{150})) = 1) ; \\
 \qquad \qquad \qquad t_{150}: \mu(p_{21}) \geq \qquad \qquad \qquad (p_{21}, I(t_{150})) ; \\
 \mu'(p_{13}) = \mu(p_{13}) + 1(\#(p_{13}, O(t_{150})) = 1) - 1(\#(p_{13}, I(t_{160})) = 1) \\
 \qquad \qquad \qquad - 1(\#(p_{13}, I(t_{510})) = 1) ; \\
 \qquad \qquad \qquad t_{160}: \mu(p_{13}) \geq \qquad \qquad \qquad (p_{13}, I(t_{160})) \text{ и } \mu(p_{30}) \geq (p_{30}, I(t_{160})) ; \\
 \mu'(p_{14}) = \mu(p_{14}) + 1(\#(p_{14}, O(t_{160})) = 1) - 1(\#(p_{14}, I(t_{170})) = 1) ; \\
 \qquad \qquad \qquad t_{170}: \mu(p_{14}) \geq \qquad \qquad \qquad (p_{14}, I(t_{170})) ; \\
 \mu'(p_{15}) = \mu(p_{15}) + 1(\#(p_{15}, O(t_{170})) = 1) + 1(\#(p_{15}, O(t_{540})) = 1) \\
 \qquad \qquad \qquad - 1(\#(p_{15}, I(t_{180})) = 1) ; \\
 \qquad \qquad \qquad t_{180}: \mu(p_{15}) \geq \qquad \qquad \qquad (p_{15}, I(t_{180})) ; \\
 \mu'(p_2) = \mu(p_2) + 1(\#(p_2, O(t_{180})) = 1) - 150(\#(p_2, I(t_{190})) = 150) ; \\
 \qquad \qquad \qquad t_{190}: \mu(p_2) \geq \qquad \qquad \qquad (p_2, I(t_{190})) ; \\
 \mu'(p_{30}) = \mu(p_{30}) + 1(\#(p_{30}, O(t_{110})) = 1) + 1(\#(p_{30}, O(t_{160})) = 1) \\
 + 2(\#(p_{30}, O(t_{20})) = 2) - 1(\#(p_{30}, I(t_{110})) = 1) - 1(\#(p_{30}, I(t_{160})) = 1) \\
 - 1(\#(p_{30}, I(t_{20})) = 1) - 100(\#(p_{30}, I(t_{10})) = 100) + 5(\#(p_{30}, O(t_{50})) = 5) ; \\
 \qquad \qquad \qquad t_{20}: \mu(p_{30}) \geq \qquad \qquad \qquad (p_{30}, I(t_{20})) ; \\
 \mu'(p_{31}) = \mu(p_{31}) + 1(\#(p_{31}, O(t_{530})) = 1) - 100(\#(p_{31}, O(t_{40})) = 100) \\
 + 1(\#(p_{31}, O(t_{510})) = 1) + 5(\#(p_{31}, O(t_{10})) = 5) \\
 - 1(\#(p_{31}, I(t_{530})) = 1) - 1(\#(p_{31}, I(t_{530})) = 1) \\
 - 1(\#(p_{31}, I(t_{50})) = 1) + 2(\#(p_{31}, O(t_{50})) = 2) ; \\
 \mu'(p_{40}) = \mu(p_{40}) + 1(\#(p_{40}, O(t_{530})) = 1) - 1(\#(p_{40}, I(t_{520})) = 1) ; \\
 \mu'(p_{41}) = \mu(p_{41}) + 1(\#(p_{41}, O(t_{510})) = 1) - 1(\#(p_{41}, I(t_{540})) = 1) ; \\
 \qquad \qquad \qquad t_{510}: \mu(p_{31}) \geq \qquad \qquad \qquad (p_{31}, I(t_{510})) \text{ и } \mu(p_{13}) \geq (p_{13}, I(t_{510})) ; \\
 \qquad \qquad \qquad t_{520}: \mu(p_{31}) \geq \qquad \qquad \qquad (p_{31}, I(t_{520})) ; \\
 \qquad \qquad \qquad t_{540}: \mu(p_{31}) \geq \qquad \qquad \qquad (p_{31}, I(t_{540})) ; \\
 \qquad \qquad \qquad t_{530}: \mu(p_{31}) \geq \qquad \qquad \qquad (p_{31}, I(t_{530})) \text{ и } \mu(p_{10}) \geq (p_{10}, I(t_{530})) ; \\
 \qquad \qquad \qquad t_{40}: \mu(p_{31}) \geq \qquad \qquad \qquad (p_{31}, I(t_{40})) ; \\
 \qquad \qquad \qquad t_{50}: \mu(p_{31}) \geq \qquad \qquad \qquad (p_{31}, I(t_{50})) .
 \end{array} \right. \quad (2)$$

В момент τ_{0a} происходит изменение алгоритмов маршрутизации трафика в обход легитимных каналов (позиции p_{11}, p_{14}), которые заменяются сторонними устройствами (позиции p_{40}, p_{41}). Через некоторое время происходит восстановление исходной маршрутизации (момент τ_{ka}) через позиции p_{11}, p_{14} и система возвращается к исходному состоянию. Кроме того, на рисунке 3 представлена диаграмма работы счетчиков, имитирующих потенциальное действие третьих лиц: момент подключения к каналам передачи

информации τ_{0a} и отключения $\tau_{ка}$, а также объем считанной информации. Диаграмма показывает, что процесс обмена информацией между участниками структуры «ДЦ – ВВК – система автоведения локомотива» не меняется во время изменения алгоритмов маршрутизации (работа позиций $p_{10}, p_{12}, p_{13}, p_{15}$ не меняется), что демонстрирует потенциальную прозрачность этого процесса для всех участников обмена информацией.

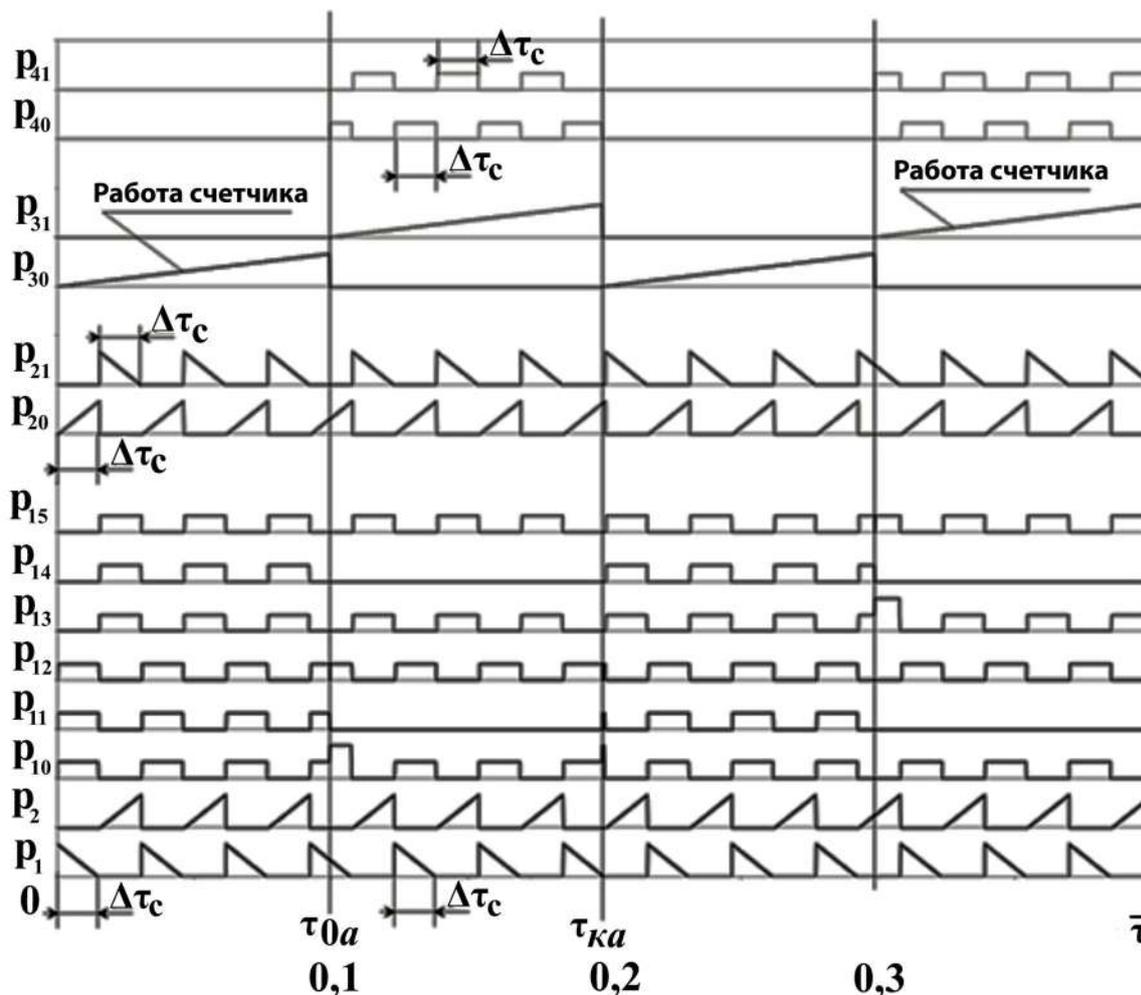


Рисунок 3 – Результаты моделирования маршрутизации трафика между ресурсом ДЦ – ВВК и системой автоведения локомотива в режиме текущего времени τ ($\tau_{0a}, \tau_{ка}$ – время начала и завершения процесса передачи информации по нештатным каналам)

Такое изменение маршрутизации трафика может привести к сбоям, отказам или вовсе к нарушению алгоритма функционирования комплекса «ДЦ – ВВК – система автоведения локомотива». Наиболее безопасным для текущего момента времени является утечка актуальной информации. Исходя из этого важной задачей обеспечения стабильной и безотказной работы комплекса являются меры повышения надежности функционирования каналов передачи данных и средств маршрутизации, в том числе программного обеспечения.

Предлагаемая адаптивная система управления поездами должна обеспечивать характеристики надежности передачи информации не ниже существующей системы, реализованной с помощью ДЦ. С учетом структуры ВВК и методов виртуализации возникает возможность следующих основных вариантов нарушений его легитимной работы: нарушение работы сервера виртуализации; нарушение работы репозитория ВМ; нарушение работы собственно ВМ, нарушение работы сетевой инфраструктуры.

Для расчета вероятности нарушений в каналах передачи данных был использован метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Этот метод позволяет получить адекватный

результат численного исследования функционирования сложных систем, процессы в которых не соответствуют марковским.

Целью расчета было определить степень надежности передачи информации по легитимным каналам системы при наличии контрольных сумм этой информации. В основу расчета достоверности передаваемой информации в адаптивной системе управления движением поездов был положен метод Б. Шнайера с использованием дерева отказов. В качестве вершин дерева отказов в структуре ВВК принимались его элементы: хост, репозиторий, ВМ, сетевая инфраструктура. Информация, размещенная на ВМ, рассматривалась как корень дерева. Структура дерева отказов представляла собой множество маршрутов нарушений в работе каналов передачи информации. В соответствии с моделью (2) вероятность нарушения в работе канала соответствовала времени срабатывания перехода τ_j (см. рисунок 2):

$$\tau_j = k1_j \cdot R1_j + k2_j \cdot R2_j + k3_j \cdot R3_j, \quad (3)$$

где $R1_j, R2_j, R3_j$ – случайные величины, характеризующие надежность работы канала передачи информации, надежность используемых контрольных сумм и время прохождения легитимной информации; $k1_j, k2_j, k3_j$ – коэффициенты приведения величин $R1_j, R2_j, R3_j$ к размерности времени.

Величины $R1_j, R2_j, R3_j$ задавались генератором случайных чисел в диапазоне 0,01...1, распределенных по нормальному закону, если переход имеет защиту $0,01 \leq R_j \leq 10$.

Процесс нарушения работы канала конфиденциальности передаваемой информации моделировался в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 2 в терминах цветных сетей Петри.

Для получения численных результатов принимались статистические данные о киберугрозах 2023 г. [14].

В соответствии с данными, приведенными в аналитическом отчете [15], при использовании стандартных средств разграничения прав доступа к ответственным вычислительным ресурсам и мониторинга процессов сети среднестатистическое нарушение возникает за 168 ч. Это время было принято как базовая величина ($base = 168$ ч) для определения эффективных средств защиты ресурса ВВК.

Результаты расчета надежности работы каналов передачи информации в адаптивной системе управления движением поездов показали, что наиболее эффективной мерой является контроль работы хоста ВВК (рисунок 4).

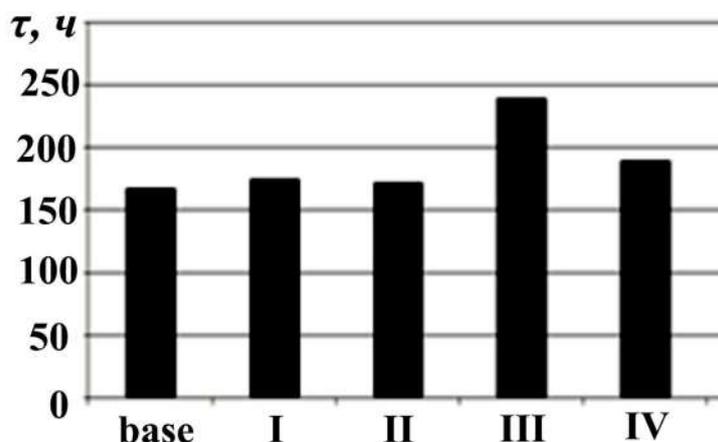


Рисунок 4 – Расчетное время возникновения нарушений в процессе передачи информации ВВК:
I – защита ВМ; II – защита репозитория ВМ; III – защита хостовой системы;
IV – средства обеспечения безопасности сетевой инфраструктуры

В этом случае среднестатистическое время возникновения нарушения передачи данных составит 240 ч против базового 168 ч, т. е. возрастет более чем на 40 %. Увеличение времени нарушения легитимной информации почти в 1,5 раза позволит диспетчеру вовремя обнаружить сбой в работе системы и предотвратить негативные последствия этого сбоя.

В статье предложена структура адаптивной системы управления поездом на сети ж. д., которая предполагает разворачивание виртуального вычислительного комплекса на вычислительном ресурсе сервера ДЦ. При этом виртуальному вычислительному комплексу должны быть переданы функции расчета оптимального алгоритма управления локомотивом по заданным критериям в условиях параметрической неопределенности на основании данных о поездной ситуации, получаемых с ДЦ, и допустимых нагрузках оборудования локомотива, получаемых от его системы автоведения. Увеличение мощности вычислительного ресурса позволяет реализовать на нем самообучающийся алгоритм управления локомотивом, но при этом возникает повышенная опасность возникновения нарушений в работе каналов передачи информации. С целью определения эффективных методов, обеспечивающих надежность функционирования каналов передачи информации в адаптивной системе управления движением поездов, разработана ее динамическая модель в терминах цветных сетей Петри. Расчеты показали, что наибольшую эффективность будет иметь защита хостовой системы ВВК, на которой развернуты ВМ.

Список литературы

1. Еремин, Е. Л. Алгоритмы адаптации дискретно-непрерывных систем для объектов с запаздыванием по управлению / Е. Л. Еремин, Л. В. Чепак. – Текст : электронный // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11. – № 3. – С. 61-72 // www.ict.nsc.ru. – URL: <http://www.ict.nsc.ru/jct/getfile.php?id=813>. (дата обращения: 25.05.2023).
2. Жмудь, В. А. Адаптивные системы автоматического управления с единственным контуром / В. А. Жмудь. – Текст : электронный // Автоматика и программная инженерия. – 2014. – № 2 (8). – С. 106–122 // jurnal.nips.ru. – URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-2-2014-11.pdf> (дата обращения: 25.05.2023).
3. Баранов, Л. А. Подходы к моделированию пассажиропотоков в рамках функционирования интеллектуальной системы управления городскими рельсовыми транспортными системами / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Л. Н. Логинова. – Текст : непосредственный // Автоматика на транспорте. – 2021. – Т. 7. – № 4. – С. 539–559.
4. Приходько, Д. И. Экономическая целесообразность технологий виртуализации / Д. И. Приходько. – Текст : электронный // материалы II Международной научно-практической конференции МЦНС «Наука и просвещение» Пенза, 2018 г. – С. 280–282. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_32691097_14666116.pdf (дата обращения: 26.05.2023). – EDN: YTVWMY.
5. Nancy Jain, Sakshi Choudhary. Overview of virtualization in cloud computing. 2016 *Symposium on Colossal Data Analysis and Networking (CDAN)*. DOI: 10.1109/CDAN.2016.7570950. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7570950> (accessed 26.05.2023).
6. Mohd Amaan Khan, Aanchal Sharma. Deep Overview of Virtualization Technologies Environment and Cloud Security. 2023 *2nd International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*, 2023, pp. 1-6. DOI: 10.1109/INOCON57975.2023.10101349. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10101349> (accessed 26.05.2023).
7. Соловьев, В. П. Вычислительный комплекс системы управления движением поездов / В. П. Соловьев, Д. А. Корнев. – Текст : непосредственный // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2015. – № 4. – С. 5–9.

8. Программный комплекс диспетчерской централизации «СЕТУНЬ» 2.0. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2014614475 от 25.04.2014. – Текст : электронный. – URL: <https://www.dcsetun.ru/> (дата обращения: 26.05.2023).

9. Валиев, Р. Ш. Возможности подсистемы протоколирования в диспетчерской централизации «Сетуень» / Р. Ш. Валиев, Е. С. Ходневич. – nilksa.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://nilksa.ru/wp-content/uploads/2017/05/research108.pdf> (дата обращения: 27.05.2023).

10. Положения об учете, расследовании и анализе отказов в работе технических средств на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАС АНТ и положения об учете, расследовании и анализе технологических нарушений в перевозочном процессе на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАСАТ (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 1 октября 2018 г. № 2160р) // base.garant.ru : сайт. – Текст: электронный. – URL: <https://base.garant.ru/70564504/> (дата обращения: 01.03.2023).

11. Соловьев, В. П. Использование сети Петри для анализа уязвимости виртуальной инфраструктуры / В. П. Соловьев, Д. А. Корнев. – Текст : непосредственный // Труды пятнадцатой научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» / Московский гос. ун-т путей сообщения (МИИТ). – Москва, 2014. – С. II-87 – II-88.

12. Azarnova T.V., Beloshitskiy A.A. and Kashirina I.L. Application of Bayesian networks and Petri nets apparatus for the study of projects implementation calendar plans. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1902, 012095, DOI 10.1088/1742-6596/1902/1/012095. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1902/1/012095> (accessed 28.05.2023).

13. Petrosov D.A. Use of the mathematical apparatus of Petri nets in the problems of modeling «ROAD CARDS», *Science and Society*, 2019, no. 4, pp. 128-134. London. EDN: RGGGVS. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41514968> (accessed 28.05.2023).

14. Актуальные киберугрозы: I квартал 2023 г. // www.ptsecurity.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2023-q1/> (дата обращения: 04.08.2023).

15. Статистика уязвимостей корпоративных информационных систем за 2011-2012 годы: аналитический отчет // www.ptsecurity.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: http://www.ptsecurity.ru/download/Analitika_pentest.pdf (дата обращения: 04.08.2023).

References

1. Eremin E.L., Chepak L.V. Adaptation algorithms for emergency-continuous systems for objects with control delays. *Vychislitel'nye tehnologii – Computational technologies*, 2006, vol. 11, no. 3, pp. 61-72. Available at: <http://www.ict.nsc.ru/jct/getfile.php?id=813>. (accessed 25.05.2023) (In Russian).

2. Zhmud V.A. Adaptive automatic control systems with one main circuit. *Avtomatika i programmnaia inzhenerija – Automatics & Software Enginery*, 2014, no. 2 (8), pp. 106-122. Available at: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-2-2014-11.pdf> (accessed 25.05.2023) (In Russian).

3. Baranov L.A. Sidorenko V.G., Loginova L.N. Approaches to modeling passenger flows within the framework of a reduced intelligent control system for urban railway transport chains. *Avtomatika na transporte – Transport automation research*, 2021, vol. 7, no. 4, pp. 539-559 (In Russian).

4. Prihodko D.I. [Economic support for virtualization technologies]. *Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii MCNS «Nauka i prosveshhenie»* [Materials of the II International Scientific and Practical Conference ICNS «Science and Education»]. Penza, 2018, pp. 280-282. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_32691097_14666116.pdf (accessed 26.05.2023). EDN: YTVWMY (In Russian).

5. Nancy Jain, Sakshi Choudhary. Overview of virtualization in cloud computing. *2016 Symposium on Colossal Data Analysis and Networking (CDAN)*. DOI: 10.1109/CDAN.2016.7570950. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7570950> (accessed 26.05.2023).

6. Mohd Amaan Khan, Aanchal Sharma. Deep Overview of Virtualization Technologies Environment and Cloud Security. *2023 2nd International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*, 2023, pp. 1-6. DOI: 10.1109/INOCON57975.2023.10101349. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10101349> (accessed 26.05.2023).

7. Solowjov V.P., Kornev D.A. Computing Complex of Train Control System. *Intellektual'nye tehnologii na transporte – Intellectual Technologies on Transport*, 2015, no. 4, pp. 5-9 (In Russian).

8. *Programmnyj kompleks dispetcherskoj centralizacii «SETUN» 2.0. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii programmy dlia EVM: № 2014614475 ot 25.04.2014* [Software package for dispatch centralization «SETUN» 2.0. Certificate of state registration program for computers: No. 2014614475 dated 25.04.2014]. Available at: <https://www.dcsetun.ru/> (accessed 26.05.2023) (In Russian).

9. Valiev R.Sh., Khodnevich E.S. The capabilities of the logging subsystem in the dispatcher centralization «Setun». Available at: <https://nilksa.ru/wp-content/uploads/2017/05/research108.pdf> (accessed 27.05.2023) (In Russian).

10. Provisions for accounting, investigation and analysis of failures in the operation of technical analysis on the infrastructure of JSC Russian Railways using the automated system KAS ANT provisions and for accounting, investigation and analysis of technological volumes in the transportation process on the infrastructure of JSC Russian Railways using the automated system KASAT (approved by appointments of JSC «Russian Railways» dated October 1, 2018 no. 2160r). Available at: <https://base.garant.ru/70564504/> (accessed 01.03.2023) (In Russian).

11. Soloviev V.P., Kornev D.A. [Using the Petri net to analyze equipment vulnerabilities]. *Trudy pjatnadcatoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Bezopasnost' dvizhenija poezdov»* [Proceedings of the fifteenth scientific and practical conference «Train Safety»]. Moscow, 2014, pp. II-87–II-88 (In Russian).

12. Azarnova T.V., Beloshitskiy A.A. and Kashirina I.L. Application of Bayesian networks and Petri nets apparatus for the study of projects implementation calendar plans. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1902, 012095, DOI 10.1088/1742-6596/1902/1/012095. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1902/1/012095> (accessed 28.05.2023).

13. Petrosov D.A. Use of the mathematical apparatus of Petri nets in the problems of modeling «ROAD CARDS», *Science and Society*, 2019, no. 4, pp. 128-134. London. EDN: RGGGVS. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41514968> (accessed 28.05.2023).

14. *Aktual'nye kiberugrozy: I kvartal 2023 goda* [Current cyber threats: I quarter 2023]. Available at: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2023-q1/> (accessed 04.08.2023) (In Russian).

15. *Statistika uязvimostej korporativnyh informacionnyh sistem za 2011-2012 gody: analiticheskij otchet* [Statistics of vulnerabilities of corporate information systems for 2011-2012: analytical report]. Available at: http://www.ptsecurity.ru/download/Analitika_pentest.pdf (accessed 04.08.2023) (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Корнев Дмитрий Александрович

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»).

Нижегородская ул., д. 27, стр. 1, г. Москва, 109029, Российская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kornev Dmitry Aleksandrovich

Research and Design Institute for Information Technology, Signaling and Tele-communications on Railway Transport (JSC NIIAS), Moscow, the Russian Federation.

27 building 1, Nizhegorodskaya street, Moscow, 109029, the Russian Federation.

Кандидат технических наук, сектор решения перспективных задач отдела разработки программно-аппаратных средств систем обеспечения безопасности отделения разработки систем управления и обеспечения безопасности движения поездов Научно-технического комплекса систем управления и обеспечения безопасности движения поездов.

Тел.: +7 (915) 213-35-52.
E-mail: da.kornev@mail.ru

Ph. D. in Engineering, sector for solving advanced tasks of the department for the development of software and hardware for safety systems of the department for the development of control systems and ensuring the safety of train traffic.

Phone: +7 (915) 213-35-52.
E-mail: da.kornev@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Корнев, Д. А. Моделирование сетей передачи данных в интеллектуальной системе управления движением поездов / Д. А. Корнев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 3 (55). – С. 141 – 154.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kornev D.A. Simulation of data transmission networks in intelligent train control system. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 3 (55), pp. 141-154 (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала, соответствующим научным специальностям Номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118:

- 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;
- 2.9.4. Управление процессами перевозок;
- 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;
- 2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
- 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника;
- 2.4.5. Энергетические системы и комплексы;
- 2.4.3. Электроэнергетика;
- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы;
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционного совета журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru.

Правила представления материалов научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию журнала представляются:

1. Текст статьи на бумаге формата А4.
2. Текст статьи в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc или фамилия.docx.
3. Экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати (по форме, принятой в организации авторов).
4. Отчет о проверке на заимствования в системе «Антиплагиат» (<https://www.antiplagiat.ru/>). Оригинальность должна составлять не менее 80 %.
5. Гарантийное письмо о передаче авторского права с подписями всех соавторов статьи.

В тексте статьи обязательно указывается тематический раздел журнала, в который подается статья и научная специальность, которой она соответствует.

Текст статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию авторов (место работы или учебы), заглавие статьи, аннотацию, ключевые слова на русском и английском языках, текст статьи, список литературы в русском и латинском алфавитах, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Текст статьи оформляется в соответствии с установленным образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть: оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); «англоязычной» (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы – формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей – 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста – Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (выполняются только в редакторе MathType): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт; начертание и размер символов в расшифровке формул по тексту должны в точности совпадать с начертанием и размером символов в самой формуле; при записи формул следует использовать значок градуса (°), а не цифру «ноль» (0); следует использовать знак умножения (×), а не букву «х»; в качестве знаков препинания между словами используются тире (–), а не дефисы (-).

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы, такие как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

необходимо использовать французские кавычки («ёлочки»);

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

автоматическую нумерацию необходимо полностью исключить;

инициалы и фамилии не должны отделяться друг от друга;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в отдельном (исходном) файле в редактируемом виде;

рисунки и таблицы должны иметь только книжную ориентацию;

после текста статьи следует список использованной литературы на русском языке и в латинском алфавите;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются арабскими цифрами в квадратных скобках;

список использованной литературы на русском языке имеет заголовок *Список литературы* и оформляется по требованиям ГОСТ Р 7.0.100–2018;

список использованной литературы в латинском алфавите имеет заголовок *References* и оформляется в соответствии с установленным образцом;

при публикации научной статьи на русском или английском языке обязательным является наличие ключевых слов и аннотации на русском и английском языках;

Материалы статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число авторов статьи не должно превышать трех человек, в ином случае необходимо отдельное согласование с редакцией. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц без учета аннотации и списка литературы. В ином случае вопрос по объему статьи также необходимо согласовывать с редакцией. Иллюстрации, схемы и таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации в разных выпусках журнала.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления считается день получения редакцией окончательного текста.

Принятые к публикации материалы статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные с нарушением указанных выше требований, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

По всем вопросам, связанным с подготовкой, представлением и публикацией материалов статей, необходимо обращаться в редакцию журнала.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 3 (55) 2023

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзором) 03 июня 2009 г., регистрационный номер ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в официальном каталоге «Подписные издания» АО «Почта России» – ПП914.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

С июля 2011 г. журнал входит 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.

Издание выходит с периодичностью 4 выпуска в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Технический редактор – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии:
644046, Омская область, г. Омск, пр. Маркса, д. 35;
тел.: +7 (3812) 31-05-54;
e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 25.09.2023.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 06.10.2023.

