

научно-технический

ISSN 2220-4245  
журнал

# ИЗВЕСТИЯ

№ 3(59)

2024

# 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» СПбГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
13. Комьяков 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 – 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» ИРГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
19. Лю Цзинькунь – 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 – первый проректор, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
23. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Подвижной состав» АЛТ Университета имени Мухамеджана Тынышпаева, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казхастан).
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 Anatol'evich – 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 – 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 Alexandr 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 – the first vice-rector, vice-rector by scientific work of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
  23. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Rolling stock» of ALT of Mukhamedzhan Tyynshpaev University, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
  24. Fayziybaev 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

- Иванов А. А., Третьяков Е. А. Совершенствование установки ультразвуковой пропитки обмоток тяговых электродвигателей..... 2
- Овчаренко С. М., Минаков В. А., Платковский М. А. Влияние степени загрузки дизель-генераторной установки на расход топлива маневровых локомотивов..... 13
- Космодамианский А. С., Воробьев В. И., Измеров О. В., Карпов А. Е. Техническая инновационика и ее применение в транспортном машиностроении..... 21
- Галиев И. И., Петракова А. Г., Минжасаров М. Х. Сравнительный анализ динамической нагруженности грузовых вагонов с различными типами буксовых узлов..... 33
- Никифоров М. М. Методология оценки влияния энергосберегающих мероприятий по снижению потерь электроэнергии на энергобезопасность тяги поездов..... 46

### Управление процессами перевозок

- Вакуленко С. П., Роменский Д. Ю., Изюмников Д. В. Использование метода кластеризации DBSCAN и дополнительных факторов при планировании перевозок на примере Московской агломерации..... 55

### Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- Панин А. Ю., Панин Ю. А., Иванова Н. Г., Трифонов А. В., Пономарев А. С. Оценка экономической эффективности лубрикации рельсов для снижения воздействия на население шума от взаимодействия подвижного состава и пути..... 65

### Энергетические системы и комплексы

- Батухтин А. Г., Середкин А. А., Батухтин С. Г. Анализ вариантов повышения эколого-экономической эффективности на источниках теплоснабжения..... 75
- Бубенчиков А. А., Киселёв Г. Ю., Дорогов Б. Б., Гайбов И. А. Применение ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения типа «ротор в растробе» в целях электроснабжения объектов в Республике Алтай..... 86

### Электротехнические комплексы и системы

- Ковалева Т. В., Комяков А. А., Комякова О. О., Пашкова Н. В., Чулембаев А. М. Прогнозирование показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог..... 96
- Савина Н. В., Мясоедов Ю. В. Разработка математического аппарата для исследования тока объектов распределенной генерации..... 105
- Тамбатamba А. С., Шевлюгин М. В., Салахов Т. А. Оценка способности энергосистемы Замбии выдерживать большие тяговые нагрузки..... 119

### Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

- Маниковский А. С., Яковлев Д. А., Мухопад А. Ю. Автоматизация процесса прогнозирования электропотребления на железнодорожном транспорте с применением управляющего автомата..... 128

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТАНОВКИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРОПИТКИ ОБМОТОК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

**Аннотация.** Восстановление изоляционных свойств обмоток коллекторных тяговых электродвигателей (ТЭД) постоянного тока при текущем ремонте электровозов является весьма актуальной задачей в связи со значительной долей отказов ТЭД по причине повреждения изоляции. Изоляция обмоток электрических машин тягового подвижного состава (ТПС) является наиболее уязвимым и в то же время дорогим звеном машины.

Повышение эффективности ремонта особенно актуально в условиях существенного удорожания новых локомотивов, высокой степени износа локомотивного парка.

На основе анализа непланового ремонта, проводимого в сервисном локомотивном депо Московка, в статье рассмотрены факторы, влияющие на изоляционные свойства обмоток тяговых электродвигателей.

В качестве наиболее перспективного метода восстановления изоляции рассмотрена установка ультразвуковой пропитки тяговых электродвигателей. Представлена имитационная модель установки с системой автоматического регулирования вязкости пропиточного материала, на базе существующей ультразвуковой пропитки Омского завода транспортной электроники.

Разработанная имитационная модель состоит из нескольких этапов, включая контроль над уровнем пропиточного материала и воды в подготовительной емкости (хранения), возможность отслеживания в реальном времени температурных характеристик, поддержание необходимо уровня в емкости пропитки, а также мониторинг вязкости.

Внедрение данной системы позволяет поддерживать указанную вязкость в заданных пределах, предупреждать оператора пропиточно-сушильного отделения о своевременном снижении характеристик пропиточного материала, предотвращать возможные нештатные ситуации, а также соблюдать необходимую технологию пропитки, что в свою очередь способствует повышению качества ремонта тяговых электродвигателей в депоовских условиях.

**Ключевые слова:** система, установка, вязкость, тяговый электродвигатель, пропиточный материал, изоляция, анализ.

Anton A. Ivanov, Evgeny A. Tretyakov

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

## IMPROVEMENT OF THE INSTALLATION OF ULTRASONIC IMPREGNATION OF WINDINGS OF TRACTION MOTORS

**Abstract.** Restoring the insulating properties of the windings of collector traction electric motors (TED) of direct current during the current repair of electric locomotives is a very urgent task due to a significant proportion of TED failures due to insulation damage. Insulation of windings of electric traction rolling stock (TPS) machines is the most vulnerable and at the same time expensive part of the machine.

Improving the efficiency of repairs is especially important in conditions of a significant increase in the cost of new locomotives, a high degree of wear of the locomotive fleet.

Based on the analysis of unplanned repairs carried out at the Moskovka service locomotive depot, the article considers the factors affecting the insulating properties of the windings of traction electric motors.

The installation of ultrasonic impregnation of traction motors is considered as the most promising method of insulation restoration. A simulation model of an installation with an automatic control system for the viscosity of the impregnating material, based on the existing ultrasonic impregnation of the Omsk Plant of Transport Electronics, is presented.

The developed simulation model consists of several stages, including control over the level of impregnating material and water in the preparatory tank (storage), the ability to track temperature characteristics in real time, maintaining the necessary level in the impregnation tank, as well as viscosity monitoring.

The introduction of this system allows you to maintain the specified viscosity within specified limits, warn the operator of the impregnation and drying department about a timely decrease in the characteristics of the impregnating material, prevent possible abnormal situations, as well as comply with the necessary impregnation technology, which in turn improves the quality of repair of traction motors in depot conditions.

**Keywords:** system, installation, viscosity, traction motor, impregnating material, isolation, analysis.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Безопасность железнодорожного транспорта остается основным приоритетом стратегического научно-технического развития ОАО «РЖД». Однако в условиях ограничения внешних поставок высокотехнологичных продуктов и возможного возникновения дефицита поставляемых из-за рубежа запасных частей и материалов проведение ремонтных работ и модернизация технических средств и систем, которые ранее назначались по сроку эксплуатации или пропущенному тоннажу, а зачастую без учета проводимых ранее ремонтов и фактического состояния, должно получить научно обоснованную методологию выявления приоритетных участков для реновации и реконструкции по фактическому состоянию, с планированием бюджетов для поддержания надежности работы технических средств и систем на заданном уровне [1].

Оценить техническое состояние локомотивов представляется возможным только на основе анализа отказов, который показывает, что основным повреждаемым узлом являются электрические машины [2].

К основным причинам неисправности тяговых электродвигателей прежде всего относят температурные воздействия на изоляцию, а также ускоренное старение изоляции за счет выхода за допустимый диапазон параметров работы, увлажненности и пыли, скопившейся в кузове локомотива.

На основании полученных данных по неплановым ремонтам тяговых электродвигателей постоянного тока за период 2023 г., проводимым в сервисном локомотивном депо Московка, на рисунке 1 представлено количество неисправностей по типам ТЭД.

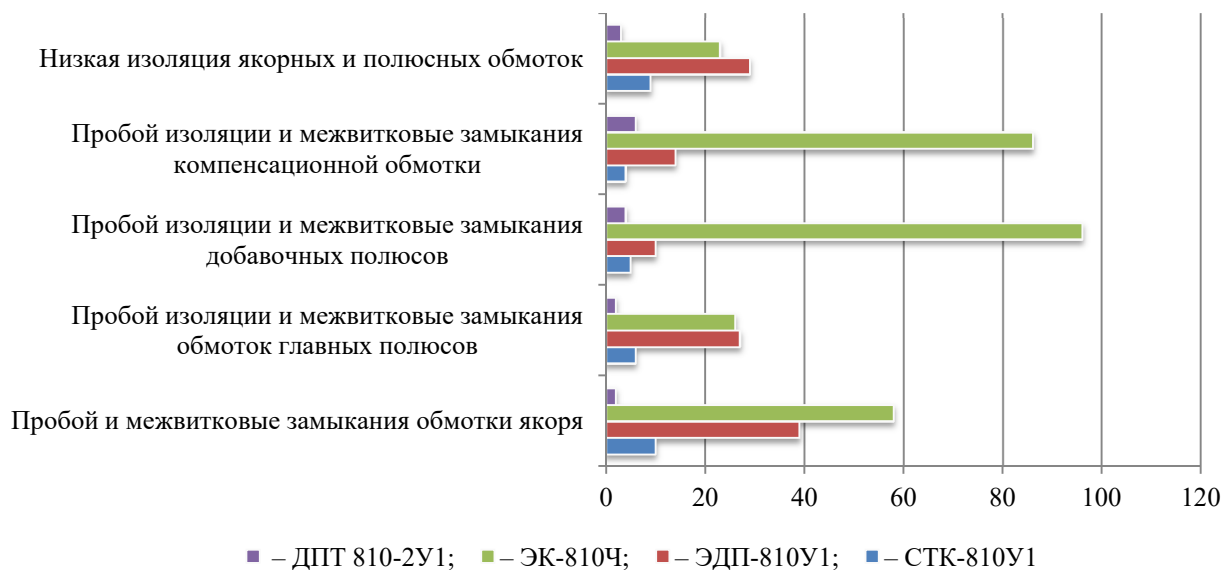


Рисунок 1 – Количество неисправностей по типам ТЭД за 2023 г.

Как следует из рисунка 1, основными неисправностями тяговых электродвигателей стали пробой и межвитковые замыкания обмоток якорей, главных, добавочных, компенсационных и полюсных обмоток.

Проведенный в работе [3] анализ данных ОАО «РЖД» о выходе из строя тяговых электродвигателей показал, что основной причиной этого является неудовлетворительная электрическая изоляция. Доля межвитковых замыканий и пробоя корпусной изоляции якоря составляет 30 – 40 % от общего числа неисправностей двигателя.

Часто в угоду ускорению процесса ремонта тягового двигателя восстановлением изоляционных свойств обмоток пренебрегают или сокращают его до обычной сухой чистки и сушки. Однако и пропитка не всегда дает 100 %-ный результат ввиду сложности работы с пропиточными установками, а также недостаточной автоматизации данного процесса.

Качественные изменения свойств обмотки после пропитки связаны с физическими свойствами самого пропиточного состава и с количеством этого пропиточного состава, проникшего в полости обмотки и оставшегося в них после операции компаундирования (сушки).

В настоящее время наиболее востребованными и результативными методами пропитывания изоляции являются ультразвуковой и вакуум-нагнетательный [4]. Как правило, вакуум-нагнетательный метод не применяется в деповских условиях, так как требуется сложная установка с автоклавом, насосами и другими элементами, управление которыми требует от работника пропиточно-сушильного отделения высокой квалификации, и требуется значительное время на пропитывание изоляции.

Ультразвуковой метод проще в работе и требует меньше времени на пропитывание изоляции за счет кавитации и вибрации стенок капилляров. При применении данного метода используется способность ультразвуковых колебаний вытеснять воздух из капилляров и одновременно обеспечивать ускоренное продвижение по ним пропитывающего состава [5].

Недостатком применения существующих подходов [6, 7] для достижения полной автоматизации и повышения качества пропитывания изоляции является отсутствие способов контроля вязкости пропиточных материалов.

Согласно документу [8] вязкость пропиточного материала должна находиться в строгом диапазоне 50 – 110 Па·с при температуре 15 – 35 °С. Сейчас вязкость измеряют перед началом смены в лабораторных условиях при помощи вискозиметра ВЗ-246.

Ввиду того, что установка может работать по 12 часов без перерыва, происходят постоянный нагрев и остывание пропиточного материала, частичное загустевание в трубопроводах, в местах фильтрации и регенерации. Эти факторы могут привести к некачественной пропитке и затруднить работу насосных агрегатов вплоть до выхода их из строя [9].

Целью данной работы является совершенствование установки ультразвуковой пропитки тяговых электродвигателей Омского завода транспортной электроники (ОмЗТЭ) путем внедрения автоматического регулирования вязкости пропиточных материалов. В качестве основного метода исследования принято имитационное моделирование в системе Matlab Simulink.

Блок-схема работы установки ультразвуковой пропитки представлена на рисунке 2. Для реализации предлагаемого подхода к совершенствованию установки указанная блок – схема дополнена контролем и управлением вязкостью.

Установка имеет две емкости: емкость хранения пропиточного материала (ПМ) и емкость пропитки.

Установка контролирует (в скобках указаны обозначения соответствующих параметров в имитационной модели):

- уровень ПМ в емкости хранения (hPM);
- уровень воды в тепловой рубашке (hW), тепловая рубашка требуется для подогрева ПМ в емкости хранения;
- температуру воды в тепловой рубашке (tW), необходимую для поддержания температуры ПМ;
- температуру самого ПМ (tPM);
- вязкость ПМ (vPM).

Согласно представленной блок – схеме выполнено имитационное моделирование алгоритма работы установки в процессе ее функционирования. Работа установки осуществляется в несколько этапов.

Первый этап: выполнение измерения объема ПМ в емкости хранения.

Заполнение происходит по линии SlivPM с задатчиком UtechkaPM с размерностью кубический метр в секунду ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) (рисунок 3).

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

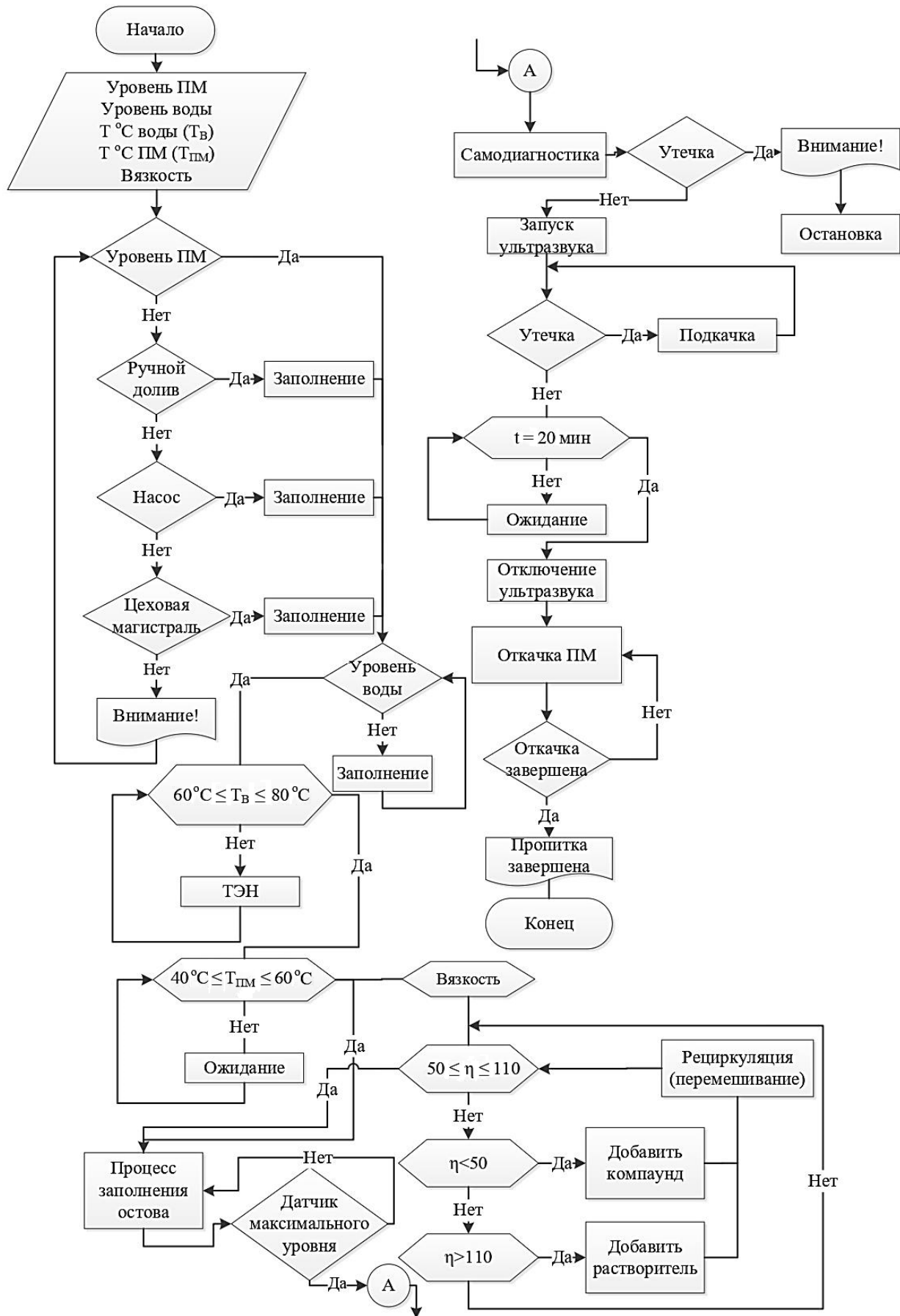


Рисунок 2 – Блок-схема работы установки ультразвуковой пропитки

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Требуемый объем определяется ограничителем hPmlimit (от 0,3 до 0,5 м<sup>3</sup>). Если требуемый уровень отсутствует, то установка предлагает три варианта заполнения: ручной долив, насос, цеховая магистраль.

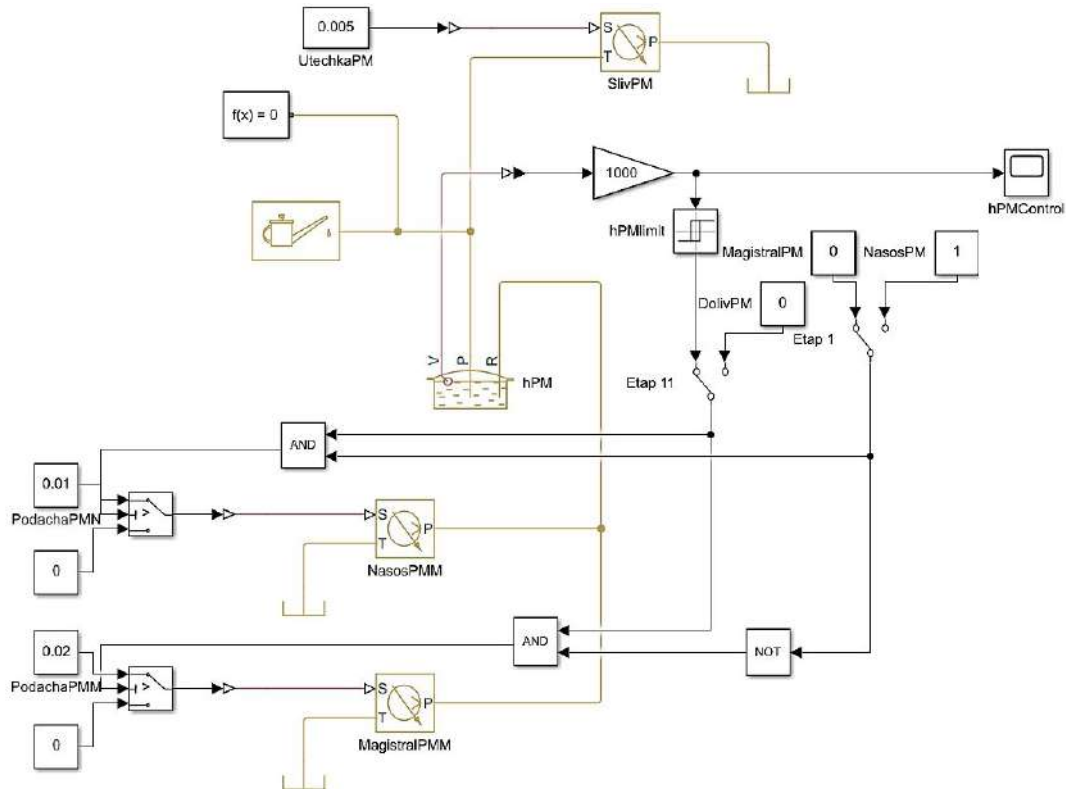


Рисунок 3 – Блок заполнения ПМ в емкости хранения

При помощи переключателей Etap 1 и Etap 11 выбирается DolivPM, NasosPM или MagistralPM. Подключаются соответствующие линии NasosPMM, MagistralPMM от датчиков Podacha PMN, PodachaPMM с размерностью кубический метр в секунду (м<sup>3</sup>/с).

Результат моделирования отслеживается на осциллографе hPMcontrol.

Второй этап: выполнение измерения объема воды в тепловой рубашке (рисунок 4).

Заполнение происходит по линии SlivW с датчиком UtechkaW с размерностью кубический метр в секунду (м<sup>3</sup>/с). Требуемый объем определяется ограничителем hWlimit (от 0,045 до 0,05 м<sup>3</sup>). Если требуемый уровень отсутствует, то установка предлагает три варианта заполнения: ручной долив, насос, цеховая магистраль.

Переключателями Etap 2 и Etap 22 выбирается DolivW, NasosW или MagistralW. Подключаются соответствующие линии NasosPW, MagistralPW от датчиков Podacha WN, PodachaWM с размерностью кубический метр в секунду (м<sup>3</sup>/с).

Результат моделирования отслеживается на осциллографе hWcontrol.

Третий этап: нагревание воды и ПМ (рисунок 5).

Включается трубчатый электронагреватель (ТЭН) воды с периодическим замером температуры, после чего начинается подогрев ПМ (до диапазона 40 – 60 °С).

Согласно выводам учебного пособия [10] инерционные свойства ТЭНа определяются блоком TENTF с передаточной функцией

$$\frac{1}{2000s^2 + 330s + 1}, \quad (1)$$

замкнутой датчиком обратной связи с передаточной функцией

$$\frac{20}{2s + 1}. \quad (2)$$

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

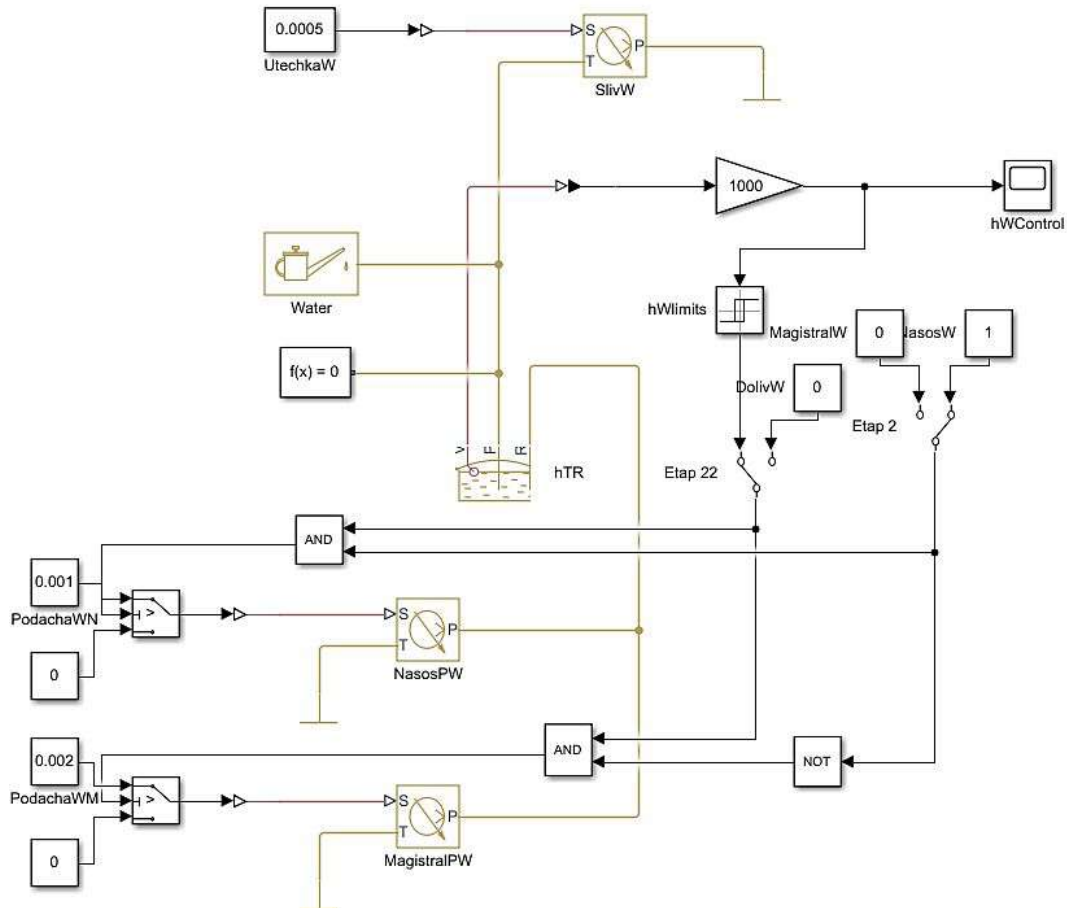


Рисунок 4 – Блок заполнения воды в тепловую рубашку

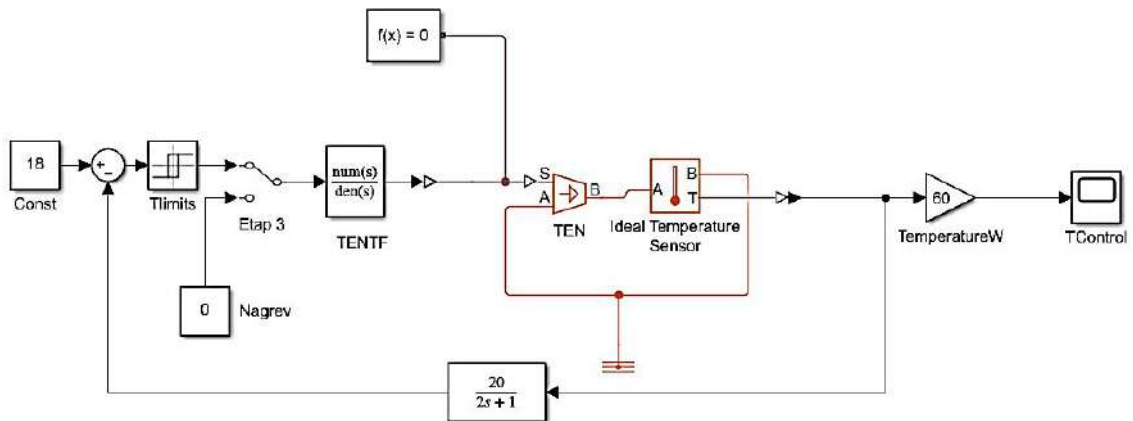


Рисунок 5 – Блок подогрева воды в тепловой рубашке и ПМ

Сигнал датчика TemperatureW определяет необходимую температуру воды. Переключателем Etap 3 выбирается регулирование температуры в заданном диапазоне с использованием реле Tlimits.

Полученное значение преобразователем TEN преобразуется в физическую величину, которая измеряется идеальным термодатчиком и выводится на осциллограф TemperatureW.

Четвертый этап: измерение вязкости (рисунок 6).

Добавление растворителя происходит по линии NasosS с датчиком PodachaS с размерностью кубический метр в секунду ( $\text{м}^3/\text{с}$ ). Требуемый объем определяется ограничителем vPMlimit (от 0,05 до 0,11  $\text{м}^3$ ). Если требуемая вязкость отсутствует, установка предлагает переключателем Etap 4 подключить долив компаунда по линии NasosC.

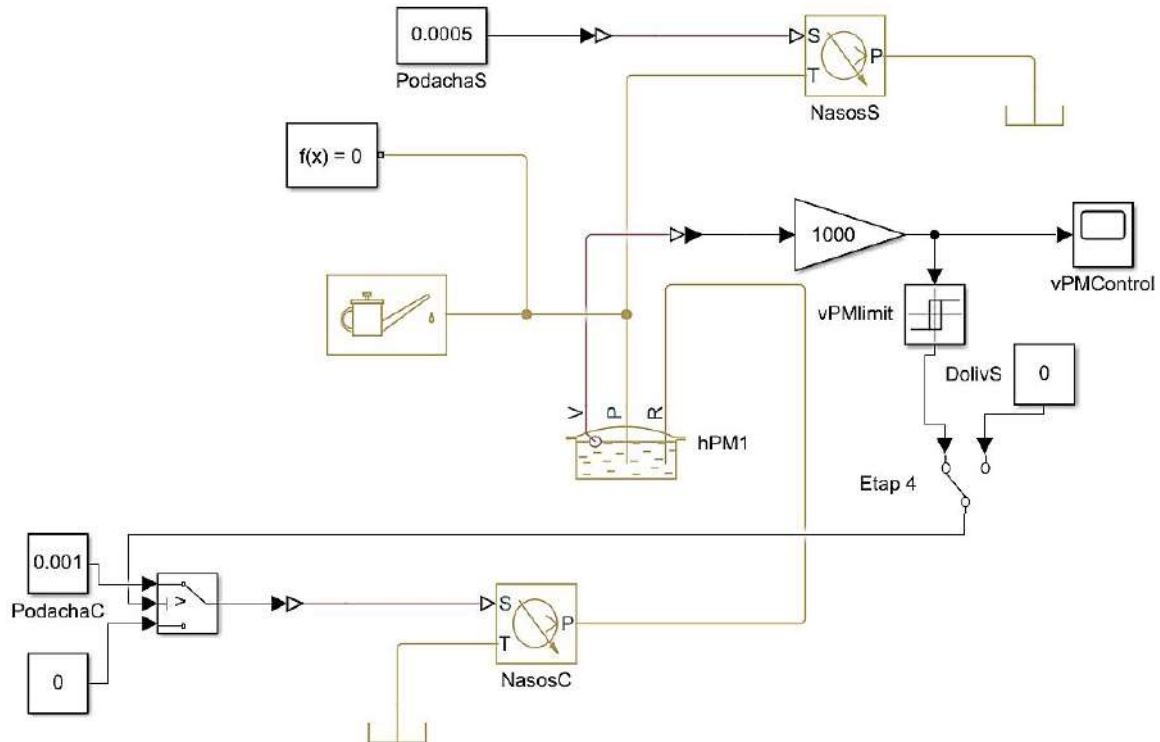


Рисунок 6 – Блок замера вязкости ПМ

Результат моделирования отслеживается на осциллографе vPMControl.

Пятый этап: перекачка ПМ из емкости хранения в емкость пропитки (рисунок 7).

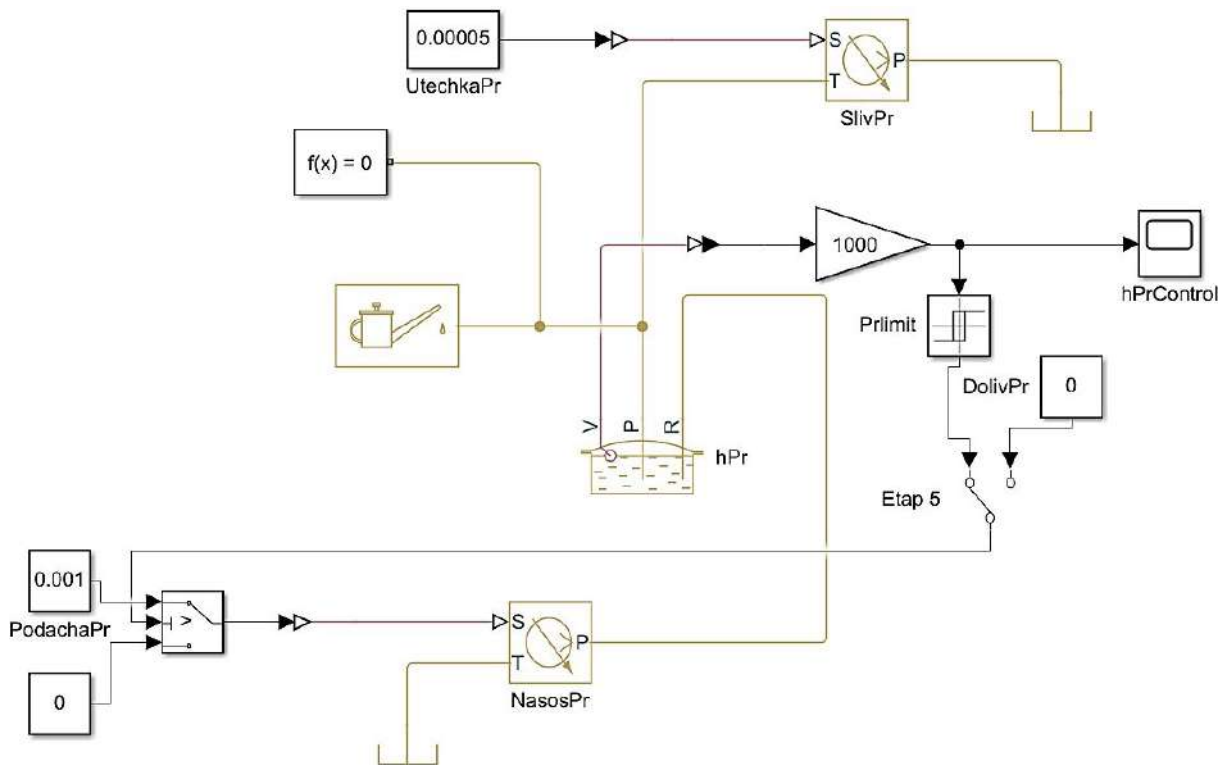


Рисунок 7 – Блок перекачки ПМ в емкость пропитки

Перекачка происходит по линии SlivPr с задатчиком UtechkaPr с размерностью кубический метр в секунду ( $\text{м}^3/\text{с}$ ). Требуемый объем определяется ограничителем hPrLimit

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

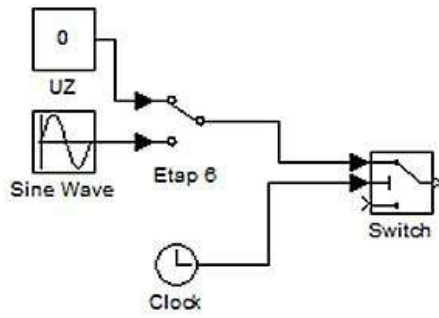


Рисунок 8 – Блок работы ультразвука

(от 0,03 до 0,04 м<sup>3</sup>). Если требуемый уровень отсутствует, то переключателем Etap 5 подключается перекачка ПМ из емкости хранения в емкость пропитки по линии NasosPr с задатчиком PodachaPr.

Шестой этап: ультразвуковая пропитка (рисунок 8).

Включается ультразвук переключателем Etap 6 на блоке Sine Wave, после 20 минут работы ультразвука (блок Clock) переключателем Switch ультразвук отключается.

Седьмой этап: откачка ПМ обратно в емкость хранения (рисунок 9).

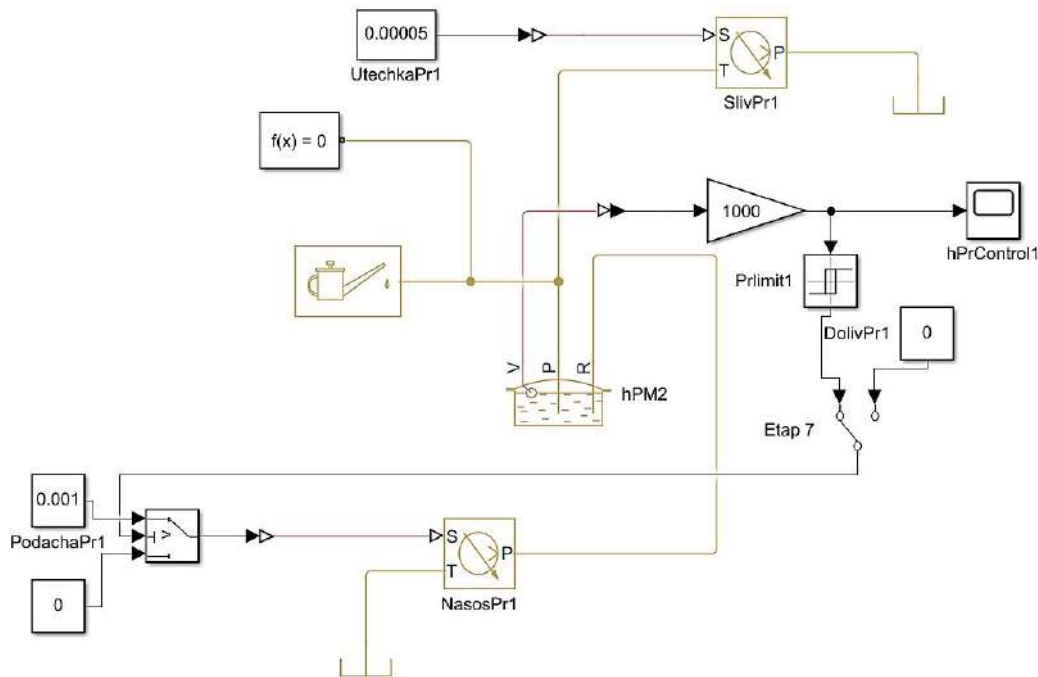


Рисунок 9 – Блок откачки ПМ обратно в емкость хранения

Откачка происходит по линии SlivPr с задатчиком UtechkaPr1 с размерностью кубический метр в секунду (м<sup>3</sup>/с). Требуемый объем определяется ограничителем hPrLimit1 (от 0,3 до 0,5 м<sup>3</sup>). Переключателем Etap 7 подключают перекачку ПМ из емкости пропитки в емкость хранения по линии NasosPr1 с задатчиком PodachaPr1.

Результаты моделирования. На рисунках 10 – 14 в виде осциллограмм представлены результаты функционирования рассматриваемой установки на каждом этапе.

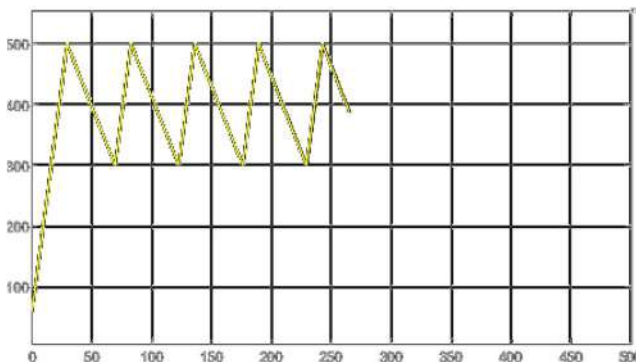


Рисунок 10 – Изменение объема ПМ (м<sup>3</sup>) в емкости хранения по времени (с)

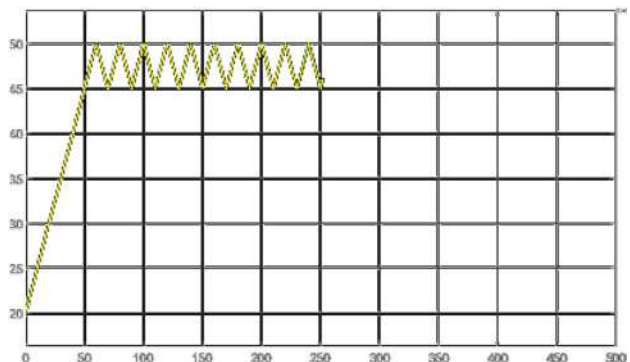


Рисунок 11 – Изменение объема воды (м<sup>3</sup>) в тепловой рубашке по времени (с)

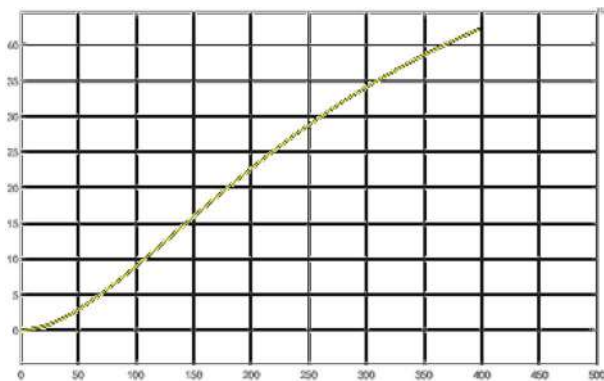


Рисунок 12 – Изменение нагрева ПМ (°C) по времени (с)

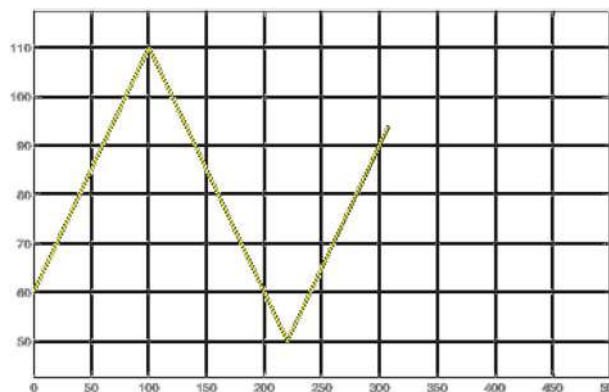


Рисунок 13 – Изменение вязкости (Па·с) по времени (с)

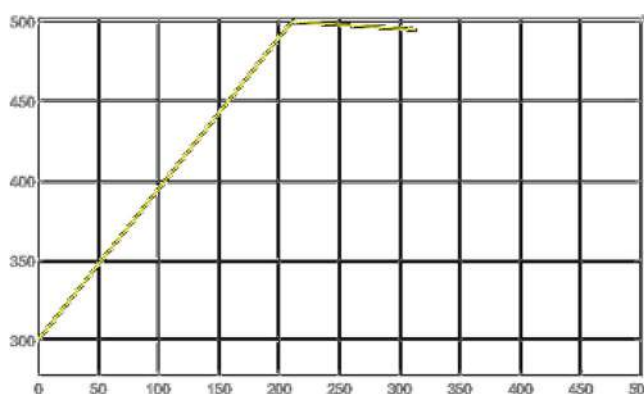


Рисунок 14 – Изменение объема ПМ (м<sup>3</sup>) по времени (с) при откачке в емкость хранения

Адекватность результатов имитационного моделирования подтверждается совпадением полученных значений с рабочим диапазоном изменения параметров действующих установок, в частности, расхождение значений объема ПМ, температуры нагрева, вязкости, полученных на модели и из паспортных данных установки, не превышает 2 %. Полученные результаты могут служить основой для дальнейшей модернизации установки с точки зрения аппаратной части, что является предметом дальнейших исследований авторов.

### Список литературы

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга). – Москва; Санкт-Петербург : ОАО «РЖД», 2018. – 128 с. – Текст : непосредственный.
2. Жупинский, Е. И. Особенности технологии ремонта изоляции обмоток тяговых электродвигателей / Е. И. Жупинский. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научно-практической конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 141–145.
3. Яценко, С. Пути повышения уровня электрических и тепловых характеристик витковой изоляции при ремонте тяговых электродвигателей / С. Яценко. – Текст : непосредственный // Кабели и провода. – 2008. – № 5 (312). – С. 24–25.
4. Сравнительная оценка качества пропитки изоляции обмоток электрических машин ультразвуковым и вакуум-нагнетательным способами / Н. И. Березинец, В. И. Коротков, Л. В. Родова, Б. Е. Рыбалко. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2009. – № 3. – С. 40–43.

5. Ванчиков, В. Ц. Электрическая изоляция обмоток тяговых двигателей локомотивов / В. Ц. Ванчиков. – Текст : непосредственный // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2006. – № 2. – С. 41–43.

6. Патент на полезную модель № 114883 U1 Российская Федерация, МПК В08В 3/12. ультразвуковая установка для мойки и пропитки якорей электродвигателей : № 2011145641/05 : заявлено 09.11.2011 : опубликовано 20.04.2012 / Демянишин С. П., Макаренко Н. Г. – Текст : непосредственный.

7. Патент № 2490771 С1 Российская Федерация, МПК H02K 15/12, H02K 15/02. Способ пропитки обмоток электротехнических изделий : № 2012123080/07 : заявлено 04.06.2012 : опубликовано 20.08.2013 / Смирнов Г. В., Смирнов Д. Г. ; заявитель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – Текст : непосредственный.

8. ПКБ ЦТ.25.0090. Пропитка изоляции обмоток тяговых и вспомогательных электрических машин локомотивов и электропоездов в деповских условиях. – Москва : ОАО «РЖД», 2011. – 67 с. – Текст : непосредственный.

9. Иванов, А. А. Установка ультразвуковой пропитки и способ ее усовершенствования / А. А. Иванов. – Текст : непосредственный // Повышение эффективности эксплуатации электромеханических преобразователей энергии в промышленности и на транспорте : материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2023. – С. 221–227.

10. Гаркушенко, В. И. Теория автоматического управления : учебное пособие / В. И. Гаркушенко, Г. Л. Дегтярев. – Казань : Казанский гос. техн. ун-т, 2010. – 274 с. – Текст : непосредственный.

## References

1. *Strategiia nauchno-tekhnologicheskogo razvitiia kholdinga «RZhD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaia kniga)* [The strategy of scientific and technological development of the Russian Railways holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Book)]. Moscow; St. Petersburg: JSCo «RZD» Publ., 2018, 128 p. (In Russian).

2. Zhupinsky E.I. [Features of insulation repair technology for windings of traction electric motors]. *Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte : materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport : materials of a scientific and practical conference]. Omsk, 2014, pp. 141-145 (In Russian).

3. Yashchenko S. Ways to increase the level of electrical and thermal characteristics of coil insulation during repair of traction electric motors. *Kabeli i provoda – Cables and wires*, 2008, no. 5 (312), pp. 24-25 (In Russian).

4. Berezinets N.I., Korotkov V.I., Rodova L.V., Rybalko B.E. Comparative assessment of the quality of impregnation of insulation of windings of electric machines by ultrasonic and vacuum injection methods. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2009, no. 3, pp. 40-43 (In Russian).

5. Vanchikov V.Ts. Electric insulation of locomotive traction motors windings. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2006, no. 2, pp. 41-43 (In Russian).

6. *Patent No. 114883 U1 Russian Federation, IPC B08B 3/12*. Ultrasonic installation for washing and impregnating electric motor anchors: No. 2011145641/05 : application 09.11.2011 : published 20.04.2012. Demyanishin S.P., Makarenko N.G.

7. *Patent No. 2490771 C1 Russian Federation, IPC H02K 15/12, H02K 15/02*. Method of impregnation of windings of electrical products: No. 2012123080/07 : application 04.06.2012: published 20.08.2013. Smirnov G.V., Smirnov D.G.; applicant Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

8. PKB TsT.25.0090 Impregnation of insulation of windings of traction and auxiliary electric machines of locomotives and electric trains in depot conditions. Moscow, JSCo «RZD» Publ., 2011, 67 p. (In Russian).

9. Ivanov A.A. [Installation of ultrasonic impregnation and a method of its improvement]. *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii elektromekhanicheskikh preobrazovatelei energii v promyshlennosti i na transporte : Materialy X vs Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posviashchennoi 120-letiiu so dnia rozhdeniia zasluzhennogo deiatelia nauki i tekhniki RSFSR, d.t.n., professora M.F. Karaseva i 80-letiiu so dnia obrazovaniia kafedry «Elektricheskie mashiny i obshchaia elektrotekhnika»* [Improving the efficiency of operation of electromechanical energy converters in industry and transport : Materials of the X All-Russian scientific and technical conference with international participation dedicated to the 120th anniversary of the birth of the Honored Worker of Science and Technology of the RSFSR, Doctor of Technical Sciences, Professor M.F. Karasev and the 80th anniversary of the establishment of the Department of Electrical Machines and General Electrical Engineering]. Omsk, 05-06 December 2023. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2023, pp. 221-227 (In Russian).

10. Garkushenko V.I., Degtyarev G.L. *Teoriia avtomaticheskogo upravleniia: uchebnoe posobie* [The theory of automatic control: study guide]. Kazan, Kazan State Technical University Publ., 2010, 274 p. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Иванов Антон Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: ivanovanton19031997@gmail.com

### Третьяков Евгений Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: eugentr@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Иванов, А. А. Совершенствование установки ультразвуковой пропитки обмоток тяговых электродвигателей / А. А. Иванов, Е. А. Третьяков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 3 (59). – С. 2 – 12.

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

### Ivanov Anton Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Electric Railways Rolling Stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: ivanovanton19031997@gmail.com

### Tretyakov Evgeny Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor Of Sciences in Engineering, docent, professor of the department «Electric Railways Rolling Stock», OSTU.

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

E-mail: eugentr@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ivanov A.A., Tretyakov E.A. Improvement of the installation of ultrasonic impregnation of windings of traction motors. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 3 (59), pp. 2-12 (In Russian).

С. М. Овчаренко, В. А. Минаков, М. А. Платковский

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

## ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ЗАГРУЗКИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ НА РАСХОД ТОПЛИВА МАНЕВРОВЫХ ЛОКОМОТИВОВ

**Аннотация.** Сегодня неотъемлемой частью эффективности использования маневровых локомотивов является рациональное использование топливно-энергетических ресурсов. Внедрение мероприятий по нормированию и оценке расхода топлива локомотивами позволяет выполнять оценку степени загрузки и технического состояния дизель-генераторной установки (ДГУ) с соответствующими условиями эксплуатации локомотивов. Исследования, проведенные в нескольких локомотивных депо, показали, что наблюдаются отклонения мощности ДГУ от паспортных значений. На данные отклонения влияют такие показатели, как качество настройки внешней характеристики и режимы работы дизеля тепловоза, количество переключений позиций контроллера машиниста локомотива, температура и показатели окружающей среды и др. Важно учитывать данные показатели для определения фактического расхода топлива локомотивами за рабочую смену для выполнения последующего нормирования. Сегодня на предприятиях по эксплуатации тягового подвижного состава установлена методика формирования нормы расхода топлива за рабочую смену исходя из установленных для каждой серии маневрового локомотива и станции нормативных значений расхода топлива, что не учитывает значительный разброс режимов работы ДГУ локомотива за рабочую смену и наличие разброса фактического расхода топлива за один и тот же интервал времени работы. Результаты исследования загрузки ДГУ и показателей расхода топлива маневровых локомотивов показывают, что подход по формированию нормы расхода на маневровое и хозяйственное движение по усредненным показателям (кг/ч работы) не отражает фактических процессов. Необходимо реализовать методику, учитывающую фактическую степень загрузки дизель-генераторной установки маневрового локомотива за рабочую смену.

**Ключевые слова:** маневровый тепловоз, дизель-генераторная установка, расход топлива, режимы работы, нормирование топлива.

Sergey M. Ovcharenko, Vitalii A. Minakov, Maxim A. Platkovskii

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

## THE DIESEL GENERATOR SET LOADING DEGREE INFLUENCE ON THE SHUNTING LOCOMOTIVES FUEL CONSUMPTION

**Abstract.** Today, an integral part of the efficiency of shunting locomotives is the rational use of fuel and energy resources. The implementation of measures for rationing and estimating fuel consumption by locomotives allows assessing the degree of loading and technical condition of a diesel generator set (DGU) with appropriate operating conditions of locomotives. Studies conducted on a number of locomotive depots have shown that there are deviations in the power of the DSU from the passport values. These deviations are influenced by such indicators as the quality of the external characteristic settings and operating modes of the diesel locomotive, the number of switching positions of the locomotive driver controller, temperature and environmental indicators, etc. It is important to take into account these indicators when determining the actual fuel consumption of locomotives per work shift, in order to perform subsequent rationing. Today, enterprises operating traction rolling stock have established a methodology for forming the fuel consumption rate for a trip based on the standard fuel consumption values established for each series of shunting locomotive and station, which does not take into account the significant variation in the operating modes of the locomotive's DSU per trip and the presence of a spread in actual fuel consumption over the same operating time interval. The results of the study of the loading of the DSU and the fuel consumption indicators of shunting locomotives show that the approach to forming the consumption rate for shunting and economic movement according to average indicators (kg/hour of work) does not reflect the actual processes. It is necessary to implement a methodology that takes into account the actual degree of loading of the diesel generator set of the shunting locomotive per work shift.

**Keywords:** shunting locomotive, diesel generator set, fuel consumption, operating modes, fuel rationing.

Повышение экономичности и снижение энергетических затрат всегда являлись актуальными задачами. Железнодорожный транспорт является одним из основных потребителей как электрической энергии, так и дизельного топлива на тяговые и нетяговые нужды. Значительная часть работы на железнодорожном транспорте выполняется дизельным

тяговым подвижным составом. Маневровая и хозяйственная работы являются вспомогательными видами работ и имеют свою специфику по организации работы и оценке степени загрузки локомотива. При этом возникают сложности при формировании нормы или расхода топлива за рабочую смену. В настоящее время в локомотивных депо применяется методика формирования нормы расхода топлива за рабочую смену исходя из установленных для каждой серии локомотива и станции нормативных значений расхода топлива за час работы. Нормативы могут устанавливаться на декаду, месяц или более длительный период. Такой подход не отражает реальной ситуации, учитывающей загрузку локомотива и, соответственно, фактический расход топлива. В декабре 2015 г. ОАО «РЖД» утверждено распоряжение № 3075р «Об утверждении Методики нормирования, планирования и анализа использования дизельного топлива (электроэнергии) в хозяйственном виде движения для локомотивов по данным бортовых приборов учета и скоростемерных лент». Такой подход позволяет частично учитывать специфику работы локомотива на отдельных установленных видах работы в хозяйственном движении, например: работа с восстановительными поездами; работа со снегоочистителями; работа с путевыми машинами и т. д. [1 – 2]. Для установления нормативных значений часового расхода топлива по результатам контроля бортовых систем рассчитывается усредненная норма расхода на один час работы на данном виде работ. Плановая норма расхода рассчитывается по формуле [3]

$$B^H = B_{\text{пол}}^H + B_{\text{вспом}}^H, \quad (1)$$

где  $B_{\text{пол}}^H$  – норма расхода на выполнение полезного объема работы, кг;

$B_{\text{вспом}}^H$  – норма расхода на выполнение вспомогательного объема работы, кг.

Учитывая, что норма расхода дизельного топлива за одну рабочую смену маневровым локомотивом определяется зависимостью  $B_{\text{пор}} = f(T_n, T_x, T_z, N, P)$ , где  $T_n$  – время работы в режиме нагрузки, ч;  $T_x$  – время работы в режиме холостого хода, ч;  $T_z$  – время простоя с заглушенным дизелем, ч;  $N$  – выработанная энергия, кВт;  $P$  – параметр, характеризующий техническое состояние ДГУ и оказывающий влияние на ее расходные характеристики. Тогда сумма удельного расхода топлива локомотивом за смену определяется так:  $B_i = n_i N_i t_i$ , где  $n_i$  – норма расхода топлива локомотива на  $i$ -й позиции контроллера машиниста (КМ), кг/кВт·ч;  $N_i$  – средняя вырабатываемая ДГУ энергия на  $i$ -й позиции КМ, кВт;  $t_i$  – время работы локомотива в режиме нагрузки на  $i$ -й позиции КМ, ч. При этом общее суммарное количество потребленного топлива за одну рабочую смену маневрового локомотива определяется так:

$B = \sum_{i=1}^8 (B_i)$ , где  $i$  – позиция контроллера машиниста локомотива. Необходимо учесть, что

такой метод расчета ведет к усреднению технических показателей и как результат – к общему суммарному количеству потребляемого дизельного топлива.

Усреднение показателей работы локомотива, а именно количество потребляемого топлива, для таких специфических видов работ, как маневровое или хозяйственное движение, в конечном итоге приводит к подгонке расчета нормы расхода топлива за рабочую смену к среднестатистическим значениям, которые не учитывают параметры каждой рабочей смены отдельно.

По результатам проведенного исследования выполнен анализ степени загрузки маневровых тепловозов в трех локомотивных депо, указанных как А, Б, В, которые наглядно характеризуют специфику маневровых работ по загрузке локомотива и, соответственно, по расходу топлива. На рисунках 1 – 3 представлены результаты рабочих смен – фиксируемый расход топлива от общего времени работы ДГУ и от времени работы ДГУ под нагрузкой. Необходимо отметить, что в каждом локомотивном депо существует своя специфика работы. Во всех локомотивных депо отмечена закономерность – чем большее время работает ДГУ, как

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

под нагрузкой, так и с учетом времени в режиме холостого хода, тем больше поле рассеяния расхода топлива.

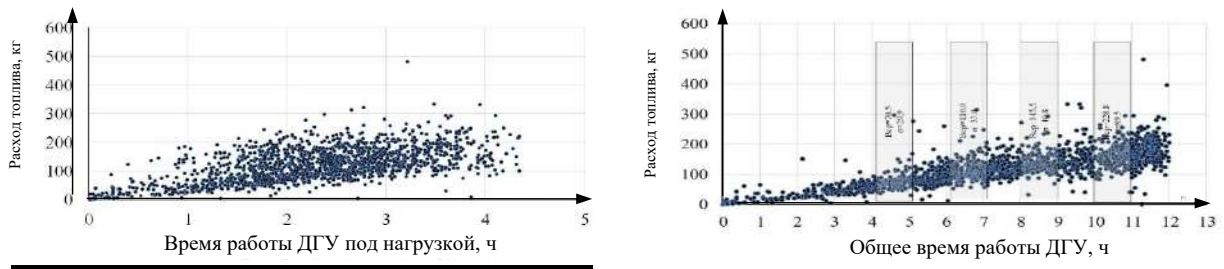


Рисунок 1 – Показатели работы тепловозов в локомотивном депо А

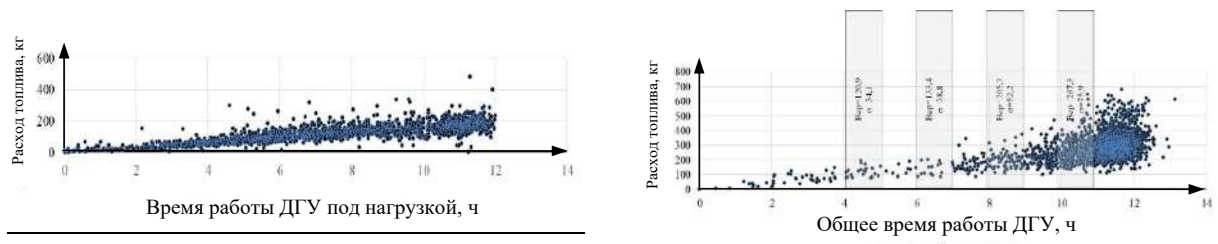


Рисунок 2 – Показатели работы тепловозов в локомотивном депо Б

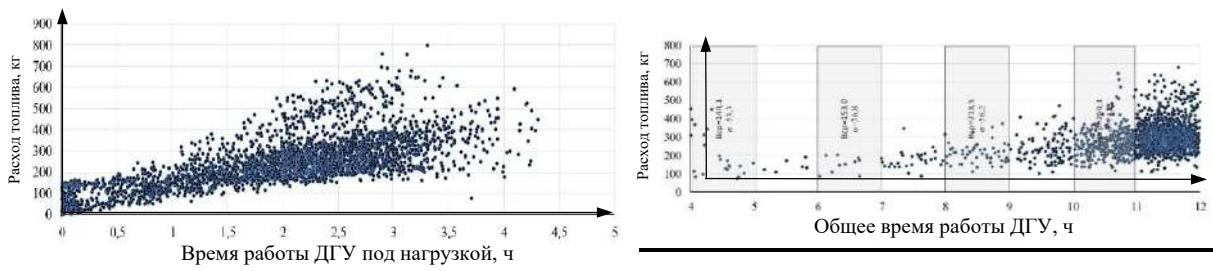


Рисунок 3 – Показатели работы тепловозов в локомотивном депо Б

Для характеристики разброса расхода топлива получены статистические данные для наиболее вероятного общего времени работы ДГУ – в пределах 10 – 11 ч по разным локомотивным депо. Существенный разброс фактического расхода топлива за рабочую смену локомотивов объясняется невозможностью организации стабильной загрузки локомотива (рисунок 4). Каждая рабочая смена является уникальной с точки зрения режимов работы локомотива и соответственно расхода топлива. Воздействие множества случайных факторов, влияющих на расход топлива, приводит к необходимости поиска подходов к решению задачи формирования обоснованной нормы расхода топлива за рабочую смену при выполнении маневровых или хозяйственных работ.

Анализ представленных на рисунке 4 данных позволяет оценить и такой важный показатель работы локомотива, как его экономичность, которая во многом зависит от технического состояния ДГУ локомотива, а в первую очередь – от технического состояния топливной аппаратуры дизеля.

В настоящее время большинство маневровых локомотивов оборудованы бортовыми системами, позволяющими фиксировать режимы работы ДГУ за одну рабочую смену локомотива. Среди таких систем следует отметить РПРТ, АПА «Борт», «БИС-Р», «Трасса ТП», «Дельта-СУ», АСК-ВИС-2В, «Смена» и др. Фиксируемая за время работы локомотива информация позволяет не только решать задачу научно обоснованного подхода к формированию нормы расхода топлива за рабочую смену, но и на основе анализа параметров

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

работы локомотива принимать меры организационного характера, позволяющие повышать эффективность эксплуатации локомотива и оценивать его техническое состояние по параметрам экономичности его работы.

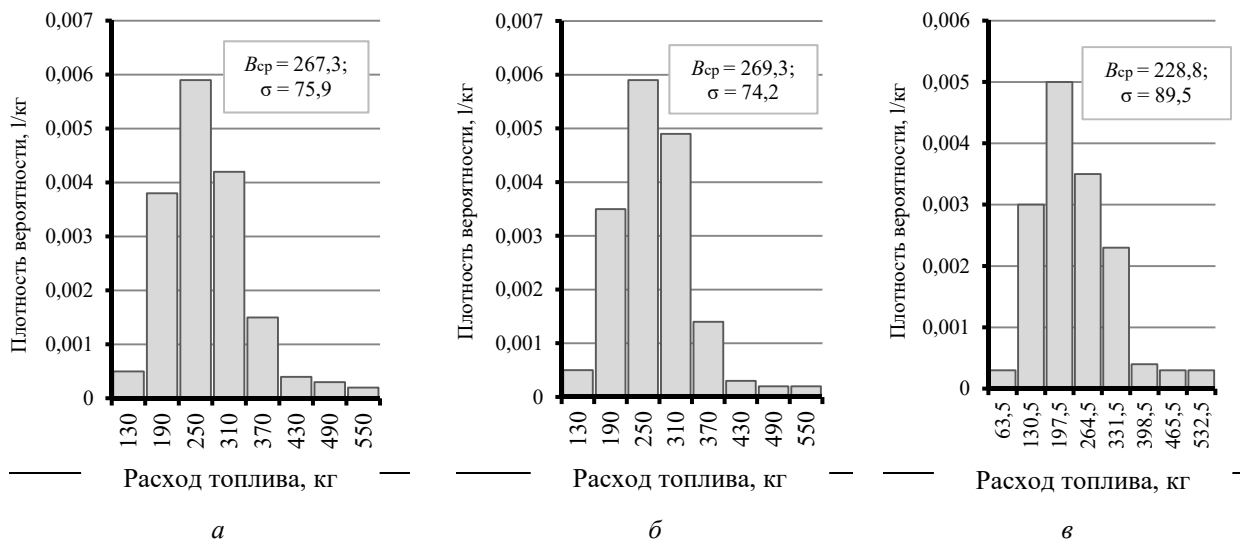


Рисунок 4 – Параметры распределения расхода топлива за смену: а – депо А; б – депо Б; в – депо В

Результаты исследования параметров распределения расхода топлива по интервалам работы ДГУ маневрового локомотива с учетом времени работы на холостом ходу приведены в таблице. С увеличением времени работы ДГУ локомотива расширяется поле разброса значений фактического расхода топлива, что объясняется индивидуальным формированием режимов работы локомотива в зависимости от фактической степени загрузки.

Распределение расхода топлива по интервалам работы ДГУ локомотива

Общее время работы ДГУ, ч	Локомотивное депо А		Локомотивное депо Б		Локомотивное депо В	
	$B_{cp}$ , кг	$\sigma$	$B_{cp}$ , кг	$\sigma$	$B_{cp}$ , кг	$\sigma$
4 – 5	70,5	29,9	144,3	53,3	120,9	34,1
6 – 7	110,0	33,0	153,0	36,8	133,4	38,8
8 – 9	145,5	40,8	213,5	56,2	205,3	52,2
10 – 11	228,8	89,5	269,3	74,2	267,3	75,9

Информация с бортовых систем позволяет подойти к решению задачи контроля как расхода топлива, так и оценки экономичности работы тепловоза.

Оценку фактического расхода топлива локомотивом за рабочую смену предлагается рассчитывать по формуле, кг:

$$B_n = \left( \begin{aligned} & \sum_{i=1}^8 t_i^{(H)} N_i^{(e)} b_i^{(H)} + \sum_{i=0}^8 t_i^{(x,x)} b_i^{(x,x)} + \sum_{i=1}^8 t_i^{(B)} b_i^{(B)} + \\ & + \sum_{i=0}^8 t_i^{(K,H)} b_i^{(K,H)} + \sum_{i=0}^8 t_i^{(K,H x,x)} b_i^{(K,H x,x)} \end{aligned} \right) k, \quad (2)$$

где  $t_i^{(H)}$  – время работы в режиме нагрузки, ч;

$t_i^{(x,x)}$  – время работы в режиме холостого хода, ч;

$i$  – позиция контроллера машиниста.

$N_i^{(e)}$  – зарегистрированное среднеэксплуатационное значение мощности ДГУ локомотива в процессе эксплуатации по позициям КМ, кВт;

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

$b_i^{(H)}$  – удельный расход топлива на  $i$ -й позиции контроллера машиниста под нагрузкой, кг/кВт·ч;

$b_i^{(X.X)}$  – часовой расход топлива на холостом режиме на  $i$ -й позиции контроллера машиниста, кг/ч;

$t_i^{(B)}$  – время работы вентилятора на  $i$ -й позиции КМ, ч;

$b_i^{(B)}$  – часовой расход топлива на привод вентилятора холодильника на  $i$ -й позиции КМ, кг/ч;

$t_i^{(K.H)}$  – время работы воздушного компрессора в режиме нагрузки, ч;

$b_i^{(K.H)}$  – часовой расход топлива на привод воздушного компрессора в режиме нагрузки, кг/ч;

$t_i^{(K.H.X.X)}$  – время работы воздушного компрессора на холостом ходу;

$b_i^{(K.H.X.X)}$  – часовой расход топлива на привод воздушного компрессора на холостом ходу;

$k$  – коэффициент, учитывающий количество переходных режимов работы ДГУ.

На увеличение расхода топлива значительное влияние оказывают переходные процессы при переключении контроллера машиниста локомотива [4]. При переключении позиции КМ требуемая частота вращения коленчатого вала устанавливается в течение 3 – 5 с с помощью перемещения топливных реек. В статье [5] приведены результаты исследования фактора  $k = 1 + 0.027(k_{pk} / 60t_s)$ , где  $k_{pk}$  – количество переключений позиций КМ;  $t_s$  – время работы локомотива. Показатели увеличения потребления топлива локомотивом в зависимости от количества переключений позиций КМ для тепловоза серии ТЭМ2 с учетом технических характеристик маневрового локомотива [6] приведены на рисунке 5.

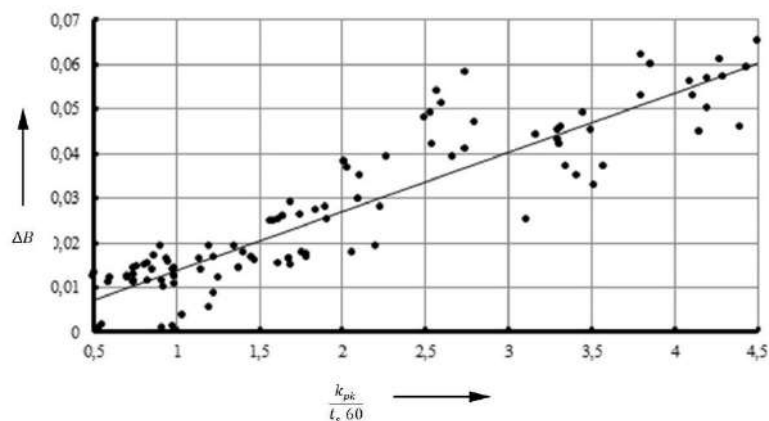


Рисунок 5 – Зависимость увеличения доли расхода топлива  $\Delta B$  от количества переключений позиций контроллера машиниста в минуту работы локомотива

При формировании оценки расхода топлива маневровым локомотивом за одну рабочую смену необходимо учитывать режимы работы вентилятора системы охлаждения дизеля и воздушного компрессора. Расход топлива на их привод составляет до 10 % от общего расхода топлива за рабочую смену [7].

Современные тепловозы оборудованы системой электронного впрыска топлива (ЭСУВТ), поэтому влияние переходных процессов на расход топлива практически не оказывает и для таких тепловозов в расчетах можно не учитывать количество переключений позиций контроллера машиниста [8]. Однако на большинстве промышленных предприятий эксплуатируются локомотивы с механическими регуляторами частоты оборотов вала дизеля. В результате реализации предлагаемого подхода в системе учета расхода топлива в ряде локомотивных депо промышленного железнодорожного транспорта получены данные по

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

расхождению значений расхода топлива, списываемого локомотивной бригадой, и расчетным значением (рисунки 6 – 8), где  $n$  – количество исследуемых локомотивов.

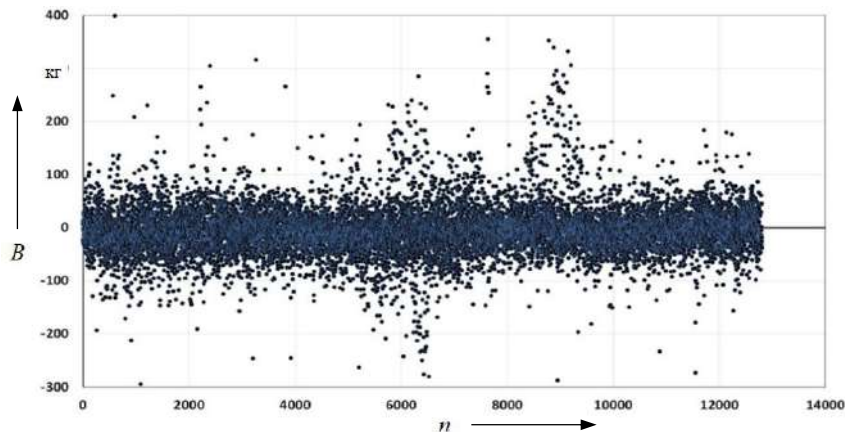


Рисунок 6 – Отклонения списываемого количества топлива от расчетного значения (локомотивное депо А)

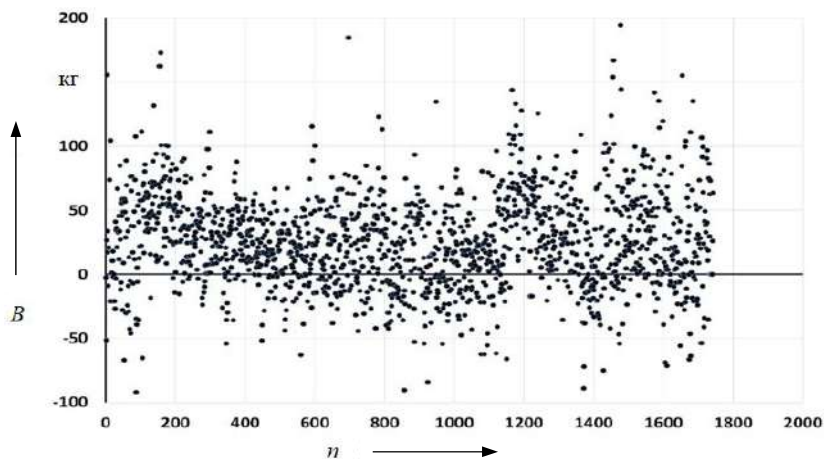


Рисунок 7 – Отклонения списываемого количества топлива от расчетного значения (локомотивное депо Б)

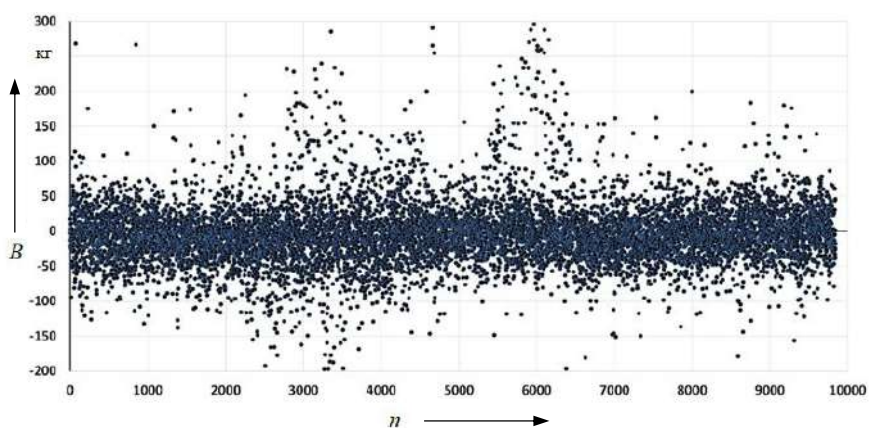


Рисунок 8 – Отклонения списываемого количества топлива от расчетного значения (локомотивное депо В)

По результатам исследования установлено, что отклонения списываемого количества топлива от расчетного значения могут достигать довольно больших значений. При списании топлива машинист в первую очередь ориентируется на установленный норматив часового расхода в зависимости от серии локомотива, при этом фактический расход топлива может существенно отличаться от нормативного значения. Предлагаемый подход позволяет

рассчитывать норму расхода индивидуально за каждую рабочую смену с учетом результатов реализованных режимов работы ДГУ локомотива. Учет множества случайных факторов, влияющих на расход топлива при выполнении маневровых и хозяйственных работ, может быть возможен при реализации моделей на основе математического аппарата искусственных нейронных сетей [9, 10]. Разработка таких моделей в настоящее время ведется на кафедре «Локомотивы» Омского государственного университета путей сообщения.

## Список литературы

1. Распоряжение № 639р от 02.04.2012 «О внесении изменений в методику планирования и нормирования расхода дизельного топлива на техническое обслуживание и ремонт тягового подвижного состава» // scbist.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://scbist.com/scb/uploaded/raspor-rzd/1661-ot-2-aprelya-2012-g-n-639r.htm> (дата обращения: 24.09.2024).
2. Головаш, А. Н. Эффективность использования бортовых систем учета топлива на локомотивах / А. Н. Головаш, В. М. Бочаров, С. М. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2008. – № 11. – С. 21–22.
3. Овчаренко, С. М. Научный подход к формированию нормы расхода топлива на маневровую работу – резерв экономии / С. М. Овчаренко, П. С. Корнеев. – Текст : непосредственный // Инновации для транспорта : материалы междунар. науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – С. 75–79.
4. Влияние переходных процессов в силовой установке маневрового тепловоза на расход топлива в эксплуатации / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский, Д. Н. Курилкин. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – № 1 – С. 48–67.
5. Корнеев, П. С. Влияние переходных процессов на расход топлива дизелем в эксплуатации / П. С. Корнеев, С. М. Овчаренко, В. А. Четвергов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2012. – № 1 (9). – С. 27–32. – EDN: OWEJLL.
6. Тепловоз ТЭМ2: Руководство по эксплуатации и обслуживанию. – Москва : Транспорт, 1980. – 151 с. – Текст : непосредственный.
7. Сковородников, Е. И. Разработка методики нормирования расхода дизельного топлива на маневровую работу / Е. И. Сковородников, А. С. Анисимов, А. В. Чулков. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2013. – № 5 (41). – С. 22–38.
8. Хомич, А. З. Экономия топлива и теплотехническая модернизация локомотивов / А. З. Хомич, О. И. Тупицын, А. Э. Симсон. – Москва : Транспорт, 1975. – 420 с. – Текст : непосредственный.
9. Овчаренко, С. М. Предпосылки совершенствования методики нормирования расхода топлива на маневровое и хозяйственное движение с использованием моделей машинного обучения / С. М. Овчаренко, В. А. Минаков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 24–30. – EDN: SJUYWV.
10. Овчаренко, С. М. Моделирование расходных характеристик с учетом технического состояния дизель-генераторной установки тепловоза / С. М. Овчаренко, П. С. Корнеев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2011. – № 4 (8). – С. 26–30. – EDN: ONNNTNTR.

## References

1. *Rasporyazhenie № 639r ot 02.04.2012 «O vnesenii izmenenij v metodiku planirovaniya i normirovaniya raskhoda dizel'nogo topliva na tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont tyagovogo podvizhnogo sostava»* [Order No. 639r dated 04/02/2012 «On Amendments to the methodology for planning and rationing diesel fuel consumption for maintenance and repair of traction rolling stock»]. Available at: <http://scbist.com/scb/uploaded/raspor-rzd/1661-ot-2-aprelya-2012-g-n-639r.htm> (accessed 24.09.2024).

2. Golovash A.N., Bocharov V.M., Kuznecov P.S. *Effektivnost' ispol'zovaniia bortovykh sistem ucheta topliva na lokomotivakh* (Efficiency of using on-board fuel metering systems on locomotives). *Lokomotiv – The locomotive*, 2008, no. 11, pp. 21-22 (In Russian).

3. Ovcharenko S.M., Korneev P.S. [A scientific approach to the formation of the fuel consumption rate for maneuvering work is a reserve of savings]. *Innovacii dlya transporta: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Innovations for transport: materials of the International Scientific and practical conference]. Omsk, 2010, pp. 75-79 (In Russian).

4. Grachev V., Grischenko A., Bazilevskiy F., Kurilkin D. *Vliianie perekhodnykh protsessov v silovoi ustanovke manevrovogo teplovoza na raskhod topliva v ekspluatatsii* (Impact of transition processes in propulsion of shunting diesel locomotive on fuel consumption in exploitation). *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy – Bulletin of scientific research result*, 2022, no. 1, pp. 48-67 (In Russian).

5. Ovcharenko S.M., Korneev P.S., Chetvergov V.A. *Vliianie perekhodnykh protsessov na raskhod topliva dizelem v ekspluatatsii* (The influence of transition processes in fuel consumption diesel engine in operation). *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2012, no. 1 (9), pp. 27-32, EDN: OWEJLL (In Russian).

6. *Teplovoz TEM2: Rukovodstvo po ekspluatatsii i obsluzhivaniyu* [Diesel locomotive TEM2: Operation and maintenance manual]. Moscow, Transport Publ., 1980, 151 p. (In Russian).

7. Skovorodnikov Ye.I., Anisimov A.S., Chulkov A.V. *Razrabotka metodiki normirovaniia raskhoda dizel'nogo topliva na manevrovuiu rabotu* (The methods to set the norms of diesel fuel consumption for shunting operations). *Vestnik transporta Povolzh'ia – Bulletin of transport of the Volga region*, 2013, no. 5 (41), pp. 22-38 (In Russian).

8. Homich A.Z., Tupizin O.E., Simson A.E. *Ekonomiya topliva i teplotekhnicheskaya modernizatsiya lokomotivov* [Fuel economy and thermal modernization of locomotives]. Moscow, Transport Publ., 1975, 420 p. (In Russian).

9. Ovcharenko S.M., Minakov V.A. *Predposylki sovershenstvovaniia metodiki normirovaniia raskhoda topliva na manevrovoe i khoziaistvennoe dvizhenie s ispol'zovaniem modelei mashinnogo obuchenii* (Prerequisites for improving the methodology for rationing fuel consumption for maneuvering and economic traffic using machine learning models). *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 2 (46), pp. 24-30, EDN: SJUYWV (In Russian).

10. Ovcharenko S.M., Korneev P.S. *Modelirovanie raskhodnykh kharakteristik s uchetom tekhnicheskogo sostoiianiia dizel'-generatornoi ustanovki teplovoza* (Modelling consumed characteristics, taking into account the technical condition the diesel engine-generating installation of the diesel locomotive). *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2011, no. 4 (8), pp. 26-30, EDN: ONNTR (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Овчаренко Сергей Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, доцент, ректор, профессор кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7 (9609) 83-75-89.

E-mail: ovcharenkosm@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Ovcharenko Sergey Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor Of Sciences in Engineering, docent, rector, professor of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (9609) 83-75-89.

E-mail: ovcharenkosm@mail.ru

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

## Минаков Виталий Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: vitalya\_13@mail.ru

## Minakov Vitaliy Anatolevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: vitalya\_13@mail.ru

## Платковский Максим Андреевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7 (962) 046-03-70.

E-mail: mplatkovskij@bk.ru

## Platkovskii Maxim Andreevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (962) 046-03-70.

E-mail: mplatkovskij@bk.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Овчаренко, С. М. Влияние степени загрузки дизель-генераторной установки на расход топлива маневровых локомотивов / С. М. Овчаренко, В. А. Минаков, М. А. Платковский. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 3 (59). – С. 13 – 21.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ovcharenko S.M., Minakov V.A., Platkovskii M.A. The diesel generator set loading degree influence on the shunting locomotives fuel consumption. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 3 (59), pp. 13-21 (In Russian).

УДК 629.4.021

## А. С. Космодамианский<sup>1</sup>, В. И. Воробьев<sup>2</sup>, О. В. Измеров<sup>2</sup>, А. Е. Карпов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Брянский государственный технический университет (БГТУ (БИТМ)), г. Брянск, Российская Федерация

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ИННОВАЦИОНКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ТРАНСПОРТНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

**Аннотация.** Рассмотрен вопрос применения методов технической инновационки при создании железнодорожного подвижного состава. Техническая инновационка – одно из направлений прикладной кибернетики, которая представляет собой логически последовательную и систематизированную совокупность знаний об инновационной деятельности в процессе создания новых технических объектов при рассмотрении этой деятельности как процессов получения, хранения, передачи и переработки информации, описывающей происходящие в этой сфере явления и существенные взаимосвязи между ними. В настоящее время основной проблемой является дальнейшая систематизация и обобщение знаний о технической инновационке и ее практическом применении в транспортном машиностроении. Предлагаемая статья является попыткой решения указанной проблемы.

В результате проведенного анализа установлено, что благодаря технической инновационке как зрелому научному направлению удалось предложить ряд новых концептуальных подходов к узлам и агрегатам локомотивов, в частности, предложить концепции энергосберегающего тягового привода локомотивов, позволяющего повысить веса поездов на 25 % агрегатного тягового привода, более простого в изготовлении и эксплуатации, чем зарубежные аналоги и непосредственного тягового привода, а также предложить ряд узлов с безынерционно управляемыми свойствами, в частности, опор кузова локомотива на тележку, гасителей колебаний, тормозов, устройства наклона кузова, гидромуфты и вариатора. Авторами получено более 150 патентов на изобретения и полезные модели.

К дальнейшим направлениям работ в области технической инновационки авторы относят поиск новых

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

методов безынерционного изменения свойств деталей и узлов подвижного состава, дальнейшую алгоритмизацию проектной деятельности, в частности, при выборе физических эффектов и способов их использования, накопление и обобщение опыта использования методов технической инновационики и поиск возможностей алгоритмизации прикладных научных исследований.

**Ключевые слова:** теория конструирования, изобретательское творчество, инженерный эксперимент, кибернетика, прогнозирование, классификация, локомотивы, тяговый привод.

Andrey S. Kosmodamiansky<sup>1</sup>, Vladimir I. Vorobyov<sup>2</sup>, Oleg V. Izmerov<sup>2</sup>, Artem E. Karpov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Russian University of Transport (RUT (МИТ)), Moscow, the Russian Federation;

<sup>2</sup>Bryansk State Technical University (BSTU (БИТМ)), Bryansk, the Russian Federation

## TECHNICAL INNOVATION AND ITS APPLICATION IN TRANSPORT ENGINEERING

**Abstract.** The issue of application of methods of technical innovation in creation of railway rolling stock is considered. Technical innovation is one of the areas of applied cybernetics, which represents a logically consistent and systematized set of knowledge about innovation activity in the process of creation of new technical objects when considering this activity as processes of receiving, storing, transmitting and processing information, describing the phenomena occurring in this area and essential interrelations between them. Today, the main problem is further systematization and generalization of knowledge about technical innovation and its practical application in transport engineering. The proposed article is an attempt to solve this problem.

As a result of the analysis, it was established that, thanks to technical innovation as a mature scientific direction, it was possible to propose a number of new conceptual approaches to locomotive units and assemblies, in particular, to propose concepts of energy-saving locomotive traction drive, allowing to increase the weight of trains by 25% of the aggregate traction drive, simpler to manufacture and operate than foreign analogues and direct traction drive, and also to propose a number of units with inertia-free controlled properties, in particular, locomotive body supports on the bogie, vibration dampers, brakes, body tilting device, fluid coupling and variator. The authors received more than 150 patents for inventions and utility models.

The authors include the search for new methods of inertia-free change of properties of parts and units of rolling stock, further algorithmization of project activities, in particular, when choosing physical effects and methods of their use, accumulation and generalization of experience in the use of methods of technical innovation and the search for possibilities of algorithmization of applied scientific research among further directions of work in the field of technical innovation.

**Keywords:** design theory, inventive creativity, engineering experiment, cybernetics, forecasting, classification, locomotives, traction drive.

В настоящее время отечественное транспортное машиностроение должно в короткие сроки решить задачи, которые можно объединить в две группы. Первая задача – оперативное замещение узлов и комплектующих зарубежного производства отечественными аналогами, вторая – создание инновационной техники, существенно отличающейся от уже освоенной производством, в частности, создание локомотивов для Восточного полигона, которые способны водить поезда весом более 7000 т, и высокоскоростного подвижного состава, способного развивать скорость 400 км/ч. Общая особенность этих технических задач состоит в том, что их необходимо решать в сжатые сроки, не обладая накопленным опытом в их решении.

В связи с этим авторами с 2010 г. по настоящее время опубликовано более двух десятков монографий, посвященных теории и практическому применению технической инновационики – одного из направлений прикладной кибернетики, которая представляет собой логически последовательную и систематизированную совокупность знаний об инновационной деятельности в процессе создания новых технических объектов при рассмотрении этой деятельности как процессов получения, хранения, передачи и переработки информации, описывающей происходящие в этой сфере явления и сущностные взаимосвязи между ними. В настоящее время основной проблемой является дальнейшая систематизация и обобщение знаний о технической инновационике и ее практическом применении в транспортном машиностроении. Предлагаемая статья является попыткой решения указанной проблемы.

Анализом существующих теорий проектирования авторами было установлено, что имеются три научных направления создания теории проектирования, которые можно охарактеризовать как предметное, личностное и инжиниринговое. Инжиниринговое направление, задача которого состоит в создании алгоритмов поиска технических решений, не имеет принципиальных ограничений использования, и оно было принято авторами в качестве основного при создании методологии.

В качестве основы технической инноватики положено обобщение, сделанное на основе работ Я. Дитриха [1]: проектирование машин представляет собой определенную форму процесса управления производством машин путем создания информационного продукта, который однозначно определяет свойства производимой машины, и целью создания которого является решение проблемы потребителей машин. Проектирование машин является информационной технологией, и общая теория проектирования машин относится к прикладной кибернетике. Исходя из этого О. В. Измеровым было предложено определять новизну (инновационность) технического объекта как недостаток у данного проектировщика информации, требуемой для проектирования и производства данного объекта ([2] и др.).

В общей системе научных знаний техническая инноватика является одним из направлений прикладной кибернетики и подчинена общей теоретической базе кибернетики. Базовым для технической инноватики является понятие информации. В связи с тем, что в настоящее время описаны шесть разных основных концепций информации [11], О. В. Измеровым было предложено применительно к сфере методологии проектирования машин принять следующее определение: «Информация – это логическая абстракция, которая используется человеком для обозначения любого свойства материи и количественного выражения этого свойства с целью решения задач управления явлениями природы и общества» [2].

Техническая инноватика взаимосвязана с различными прикладными теоретическими направлениями, которые могут быть полностью или частично построенными на эмпирической основе (известные теории проектирования, изобретательского творчества, научного поиска, принятия решений).

Внутреннюю структуру технической инноватики определяют четыре основных направления, определяемые объектами исследования. К ним относятся исследование уровней управления при выборе технических решений, исследование процессов управления при выборе технических решений, исследование объективных закономерностей развития техники проектировщиком, исследование моделей и методов их применения. О. В. Измеровым было предложено представить процесс проектирования (как управления силами природы) в виде последовательного рационального выбора проектировщиком альтернатив для каждого из уровней абстрактного описания машины с переходом от максимально абстрактного описания к конкретному, что в технической инноватике получило название «матрица уровней средств управления» [2] (рисунок 1).

Матрица уровней средств управления отличается от ранее известных методов поэтапного конструирования или поиска изобретательского решения тем, что уровни выбора решения проектировщиком связаны с методами, которые на данном уровне используются для принятия решения. Она используется в целом ряде прикладных направлений инноватики: при создании новых концепций машин, в классификации техники, для поиска решений на уровне изобретений, в технологии know-why и т. п.

Перейдем к вопросам практического использования теоретических положений и методов технической инноватики в отрасли транспортного машиностроения.

В первую очередь следует отметить, что алгоритм создания классификаций впервые позволил создать классификацию тяговых приводов подвижного состава (рисунок 2), которая служит не только для систематизации известных технических решений, но и для поиска новых [3].





## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

возможный коэффициент сцепления при случайно меняющихся условиях, то в энергосберегающем приводе поддерживается постоянство коэффициента сцепления независимо от изменения состояния системы «колесо – рельс» за счет воздействия на поверхность контакта электрического тока или магнитного поля. Поскольку в настоящее время вес состава определяется из условий вытягивания его на руководящем подъеме при наихудших условиях сцепления, энергосберегающий привод позволяет увеличить веса составов на 25 % и более.

Пример энергосберегающего тягового привода, предложенного авторами, представлен на рисунке 3.

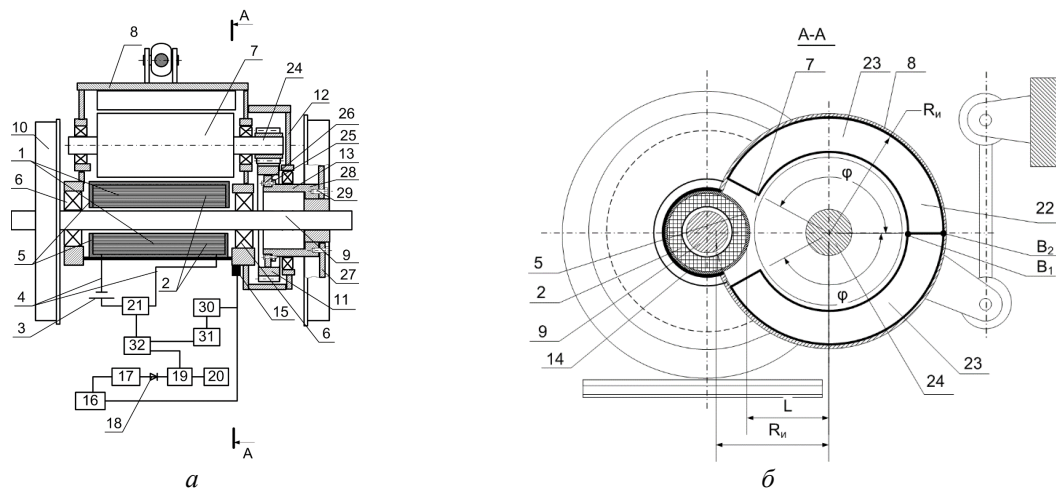


Рисунок 3 – Пример энергосберегающего тягового привода: 1 – намагничивающая обмотка; 2 – катушка; 3 – источник питания; 4 – провода; 5 – каркас; 6 – моторно-осевые подшипники; 7 – тяговый электродвигатель; 8 – корпус; 9 – ось; 10 – колесная пара; 11 – зубчатое колесо; 12 – кожух редуктора; 13 – немагнитная втулка; 14 – кожух; 15 – датчик продольных ускорений; 16 – блок измерения сигналов; 17 – полосовой фильтр; 18 – выпрямитель; 19 – блок сравнения; 20 – блок установки; 21 – ключ; 22 – статор; 23 – индуктор; 24 – вал; 25 – полый цилиндр с фланцем; 26, 29 – болтовые соединения; 27 – колесо; 28 – ступица; 30 – измерительный блок; 31 – статистический анализатор сигналов; 32 – логический элемент «ИЛИ»

В указанном варианте привода использован дугостаторный асинхронный тяговый электродвигатель с двумя индукторами, не образующими замкнутое кольцо, что позволило разместить обмотку индуктора, создающего магнитный поток в контакте колеса и рельса, на оси колесной пары без применения промежуточных зубчатых колес в тяговой передаче. Управление устройством основано на анализе продольных колебаний колесно-моторного блока, статистические характеристики которых изменяются в момент перехода к боксованию. На указанное устройство авторами получен патент на полезную модель [7].

Использование алгоритмов поиска решений на уровне изобретений, оптимизированных под конкретные задачи, позволило авторам в период с 2011 по 2024 г. получить свыше 150 патентов на изобретения и полезные модели. При этом выбор решений на верхнем уровне управления (выбор физических эффектов и способов применения) позволил создать и использовать методику поиска серий патентоспособных решений. В результате помимо устройств увеличения сцепления колеса с рельсом были запатентованы различные конструкции опор кузова железнодорожного экипажа на тележку с управляемым моментом сопротивления, фрикционных и гидравлических гасителей колебаний, рельсового и вихретокового тормозов, устройства автоматического наклона кузова в кривых, гидромуфты и фрикционного вариатора. Запатентованные устройства не имеют аналогов в мировой практике. Предложенные конструкции управляемых опор кузова и гасителей вертикальных и горизонтальных колебаний по сути дела открывают новое направление в динамике локомотива – управление динамическими свойствами экипажа в зависимости от режимов движения и внешних воздействий.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Примером такой конструкции может служить предложенный авторами гаситель горизонтальных колебаний тележки локомотива (рисунок 4).

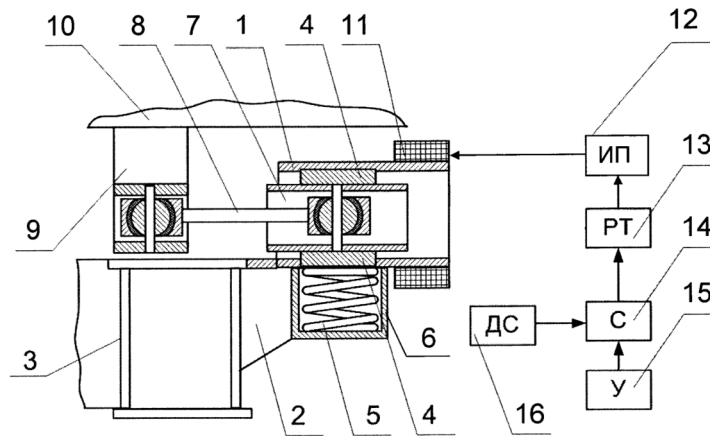


Рисунок 4 – Схема управляемого гасителя горизонтальных колебаний: 1 – корпус; 2 – кронштейн; 3 – рама тележки; 4 – фрикционные вкладыши; 5 – пружина; 6 – стакан; 7 – фрикционный стакан; 8 – тяга; 9 – кронштейн; 10 – главная рама; 11 – обмотка электромагнита; 12 – источник питания; 13 – регулятор тока; 14 – сумматор; 15 – блок установки заданной скорости движения; 16 – датчик скорости движения

При движении поезда локомотив проходит крутые кривые на небольшой скорости, при этом сила сопротивления, создаваемая гасителем, должна быть минимальной, чтобы не препятствовать повороту тележки в кривой. При движении с большой скоростью на участках пути, где встречаются только прямые и пологие кривые, сила сопротивления гасителя должна увеличиваться для снижения амплитуды поперечных колебания отбоя и виляния. Это достигается за счет увеличения коэффициента трения в гасителе путем воздействия на контактирующие поверхности магнитного поля. Управление силой тока в обмотках электромагнита производится в зависимости от скорости движения локомотива. На указанное решение авторами получен патент на полезную модель [8].

К основным практическим результатам таких направлений, как исследование рационализма выбора технических решений и анализ развития конструкций, в первую очередь можно отнести ряд концепций тягового привода.

Согласно предложенной авторами концепции агрегатного тягового привода [9] изготовление и обслуживание привода существенно упрощается по сравнению с интегрированным, применяемым на электровозах 2ЭС10 и ЭП20, поскольку редуктор и тяговый электродвигатель выполнены в виде отдельных узлов и не требуется их точное сопряжение.

Особенность концепции использования дугостаторных асинхронных двигателей в тяговом приводе заключается в том, что статор выполнен незамкнутым, что позволяет уменьшить централь зубчатой передачи, разместив ось колесной пары между концами статора, и повысить частоту оборотов двигателя [10].

Наконец, новая концепция непосредственного тягового привода позволила создать привод, не содержащий ни одного подшипника, что повышает его надежность. В известных современных конструкциях непосредственных тяговых приводов двигатель либо опирается непосредственно на ось (трамвай Variobahn [11], экспериментальный японский электропоезд с изменяемой шириной колеи [12]), привод Syntegra для вагонов метро фирмы Siemens [13]), что ведет к значительной неподрессоренной массе, либо подвешивается к раме тележки [14] или упруго опирается на нее [15], что требует расформирования колесной пары при замене роторных подшипников. В предложенной авторами конструкции (рисунок 5) снижение неподрессоренной массы достигнуто за счет разделения статора и ротора двигателя, однако в отличие от предпринимавшихся подобных попыток на ранних стадиях создания электровозов

[16] использована электрическая машина не с радиальным, а с осевым магнитным потоком. Это позволяет уменьшить зазор между статором и ротором, который при колебаниях тележки перемещается не поперек, а вдоль зазора. На предложенное решение авторами получен патент на полезную модель [17].

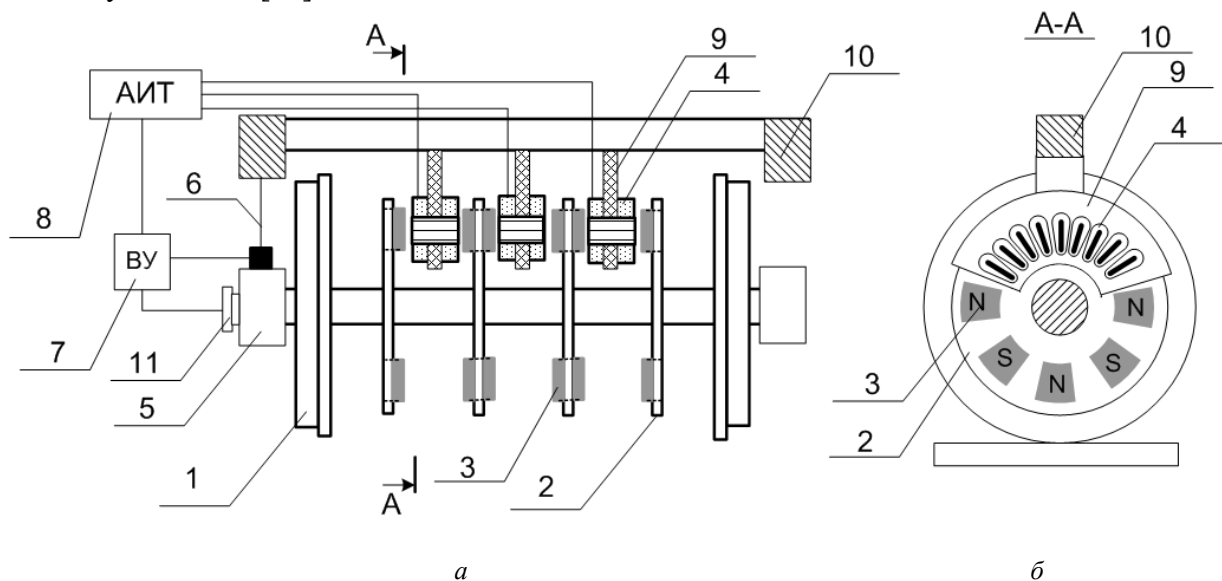


Рисунок 5 – Схема непосредственного тягового привода на основе ТЭД с разделением статора и ротора и осевым магнитным потоком: 1 – колесная пара; 2 – диск ротора; 3 – постоянный магнит; 4 – обмотка; 5 – букса; 6 – датчик перемещения буксы относительно рамы тележки; 7 – вычислительное устройство; 8 – автономный инвертор тока; 9 – дуга статора; 10 – рама тележки; 11 – датчик положения ротора

Авторами проведен анализ рациональности конструкторских решений отечественного тягового и моторвагонного подвижного состава, включая проекты перспективных локомотивов 2ТЭ30а [18], ТЭ26 [19] и ТЭМ23 [20], на основании которого дан ряд предложений по модернизации конструкции экипажной части и импортозамещению и выявлен ряд проблемных узлов. Имеются случаи, когда эти предложения были учтены проектировщиком, что констатируется, в частности, в статье [21] (сокращена база тележки, что улучшает горизонтальную динамику).

Что касается направления, рассматривающего проблемы использования математических моделей, то помимо предложенной объектной модели технических устройств авторами было доказано, что зона консервативных свойств динамической системы тягового привода при изменении жесткости валопроводов, экспериментально обнаруженная и описанная в источнике [22], является закономерным явлением, что может быть использовано при поиске оптимальных параметров системы тягового привода при проектировании. Ранее данная авторами рекомендация использовать жесткое зубчатое колесо в приводе с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и осевым редуктором была реализована в тяговом приводе серийно выпускаемого пассажирского электровоза ЭП1.

Из рассмотренного следует, что применение методов технической инноватики позволяет осуществлять следующее:

находить новые патентоспособные решения по мере возникновения потребности в них во время проектирования транспортных машин;

выдвигать новые концептуальные подходы к проектируемой технике, позволяющие решить проблемы известной продукции и радикально улучшать потребительские свойства железнодорожного транспорта;

находить и исправлять недостатки конструкции во вновь создаваемых транспортных устройствах на стадии проектирования.

В более отдаленной перспективе методы технической инноватики позволяют

создавать системы САПР следующего поколения, которые смогут предлагать проектировщику не только возможные известные варианты конструктивного исполнения, но и генерировать новые, ранее не известные.

К дальнейшим направлениям работ в области технической инновационики авторы относят поиск новых методов безынерционного изменения свойств деталей и узлов подвижного состава, дальнейшую алгоритмизацию проектной деятельности, в частности, при выборе физических эффектов и способов их использования, накопление и обобщение опыта использования методов технической инновационики и поиск возможностей алгоритмизации прикладных научных исследований.

### Список литературы

1. System i konstrukcja / Janusz Dietrych. - Warszawa : Wydaw. Nauk. - Techn., 1985, 422 s. (In Polish).
2. Кибернетические аспекты методов синтеза электромеханических систем : монография; под ред. А. С. Космодамианского. – Орел : Госуниверситет – УНПК, 2015. – 234 с. – Текст : непосредственный.
3. Столяров, Ю. Н. Онтологический и метонимический смыслы понятия «информация» / Ю. Н. Столяров. – Текст : непосредственный // Научные и технические библиотеки. – 2002. – № 3. – С. 45–51.
4. Развитие классификации механической части тяговых приводов локомотивов / В. И. Воробьев, О. В. Дорофеев, О. В. Измеров [и др.]. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2022. – № 1 (351). – С. 130–138.
5. Концепция развития энергосберегающих электромеханических систем : монография под ред. А. С. Космодамианского. – Орел : Госуниверситет – УНПК, 2014. – 244 с. – Текст : непосредственный.
6. Бирюков, И. В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И. В. Бирюков, А. И. Беляев, Е. К. Рыбников. – Москва : Транспорт, 1986. – 256 с. – Текст : непосредственный.
7. Патент на полезную модель № 225101 Российская Федерация, В61С 15/08, В61С 9/48. Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами: № 2024102710 : заявлено 04.02.2024 : опубликовано 12.04.2024 / Антипин Д. Я., Воробьев В. И., Измеров О. В., Маслов М. А., Копылов С. О., Николаев Е. В., Пугачев А. А. – Текст : непосредственный.
8. Патент на полезную модель № 196110, Российская Федерация, СПК В61F 5/12 (2019.08); F16F 7/09 (2019.08). Фрикционный гаситель горизонтальных колебаний тележки локомотива : № 2019134867 : заявлено 28.10.2019 : опубликовано 17.02.2020 / Воробьев В. И., Злобин С. Н., Измеров О. В., Дорофеев О. В., Борзенков М. И., Новиков А. С., Новиков С. Н. – Текст : непосредственный.
9. Применение агрегатных тяговых приводов для локомотивов с повышенными тяговыми свойствами / А. С. Космодамианский, А. А. Пугачев, В. И. Воробьев [и др.]. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2023. – № 2 (77). – С. 41–48.
10. Поиск путей повышения тяговых свойств тепловозов и конструкция тягового привода / В. И. Воробьев, А. А. Пугачев, О. В. Измеров, Е. В. Николаев. – Текст : непосредственный // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 12 (109). – С. 48–59.
11. Neudorfer H. *Glaser's Annalen*, 2001, no. 6/7, pp. 237-242.
12. Andreas Steimel. Power-Electronics Issues of Modern Electric Railway Systems. *10<sup>th</sup> International Conference on Development and Application Systems*, Suceava, Romania, May 27 – 29, 2010, Available at: [http://www.dasconference.ro/cd2010/data/papers/0\\_steimel.pdf](http://www.dasconference.ro/cd2010/data/papers/0_steimel.pdf) (accessed 06.09.2024).
13. Vasile Hoancă, Toma Dordea, Ștefan Păun et al. Direct-drive induction motor for railway

traction applications. *Proc. of Romanian Academy, Series A.* – Timișoara, 2011, vol. 12, no. 3, pp. 239-248.

14. Josef Kolar. Design of a Wheelset Drive. *Transactions on Electrical Engineering*, vol. 4 (2015), no. 1, pp. 11-19.

15. Endo T. *Railway Gazette International*, 2002, no. 4, pp. 201-203.

16. Andreas Steimel. Electric Traction - Motion Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrieverlag GmbH (November 16, 2007), 330 p.

17. Патент на полезную модель № 163517, Российская Федерация, МПК В61С 9/38, Н02К 21/00, Н02К 29/06. Тяговый привод локомотива : № 2015144926/11 : заявлено 19.10.2015 : опубликовано 20.07.2016 / Антипин Д. Я., Воробьев В. И., Бондаренко Д. А., Измеров О. В., Пугачев А. А., Космодамианский А. С., Новиков В. Г. . – Текст : непосредственный.

18. Антипин, Д. Я. Поиск рациональной экипажной части тепловоза с повышенной нагрузкой на ось / Д. Я. Антипин, О. В. Измеров, Д. Г. Надточей. – Текст : непосредственный // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 4. – С. 9–11.

19. Проблемы создания тепловозов для линий с небольшой интенсивностью движения / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, О. В. Измеров [и др.]. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2023. – № 2. – С. 22–31.

20. Проблемы создания перспективной двухосной тележки маневрового тепловоза / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, М. Ю. Капустин [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2020. – Т. 79. – № 3. – С. 161–170.

21. Поиск рациональных технических решений тепловоза для Восточного полигона / В. И. Воробьев, А. А. Пугачев, О. В. Измеров, Е. В. Николаев. – Текст : непосредственный // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 10 (107). – С. 53–63.

22. Динамические нагрузки в тяговом приводе тепловоза 2ТЭ121 / А. Т. Литвинов, Е. П. Акишин, Ф. Г. Вербер [и др.]. – Текст : непосредственный // Результаты испытаний тепловоза 2ТЭ121 : Труды ВНИТИ. – Коломна, 1985. – Вып. 62. – С. 119–130.

## References

1. System i konstrukcja / Janusz Dietrych. - Warszawa : Wydaw. Nauk. - Techn., 1985, 422 s. (In Polish).

2. Borzenkov M.I., Izmerov O.V., Zlobin S.N., Vorob'ev V.I., Kosmodamianskij A.S., Dorofeev O.V., Borzenkov M.I., Pugachev A.A., Kosmodamianskij A.S. ed. *Kiberneticheskie aspekty metodov sinteza elektromekhanicheskikh sistem : monografiia* [Cybernetic aspects of methods of synthesis of electromechanical systems]. Orel, Gosuniversitet-UNPK Publ., 2015, 234 p. (In Russian).

3. Stoliarov Yu.N. Ontological and metonymic meanings of the concept «information». *Nauchnye i tehniczeskie biblioteki – Scientific and Technical Libraries*, 2002, no. 3, pp. 45-51 (In Russian).

4. Vorobyev V.I., Dorofeev O.V., Izmerov O.V., Zlobin S.N., Pugachev A.A., Nikolaev E.V. Development of classification of the mechanical part of traction drives of locomotives. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii – Fundamental and applied problems of engineering and technology*, 2022, no. 1 (351), pp. 130-138 (In Russian).

5. Kosmodamianskij A.S., Borzenkov M.I., Vorob'ev V.I., Radchenko S.Ju., Izmerov O.V., Dorofeev O.V., Pugachev A.A., Zlobin S.N., Samotkanov A.V., Kosmodamianskij A.S. ed. *Kontseptsiiia razvitiia energosberegaiushchikh elektromekhanicheskikh sistem : monografiia* [The concept of development of energy-saving electromechanical systems : monograph]. Orel, Gosuniversitet-UNPK Publ., 2014, 244 p. (In Russian).

6. Biriukov I.V., Beliaev A.I., Rybnikov E.K. *Tiagovye peredachi elektropodvizhnogo sostava zheleznykh dorog* [Traction transmissions of electric rolling stock of railways]. Moscow, Transport Publ., 1986, 256 p. (In Russian).
7. Antipin D.Ya., Vorob'ev V.I., Izmerov O.V., Maslov M.A., Kopylov S.O., Nikolaev E.V., Pugachev A.A. *Patent RU 225101, B61C 15/08, B61C 9/48*, 12.04.2024 (In Russian).
8. Vorob'ev V.I., Zlobin S.N., Izmerov O.V., Dorofeev O.V., Borzenkov M.I., Novikov A.S., Novikov S.N. *Patent RU 196110 B61F 5/12 (2019.08); F16F 7/09 (2019.08)*, 17.02.2020 (In Russian).
9. Kosmodamianskiy A.S., Pugachev A.A., Vorobyev V.I., Izmerov O.V., Nikolaev E.V. Application of aggregate traction drives for locomotives with increased traction properties. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2023, no. 2 (77), pp. 41-48 (In Russian).
10. Vorob'ev V., Pugachev A., Izmerov O., Nikolaev E. Search for ways to improve the traction properties of locomotives and traction drive design. *Vestnik brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Bryansk state technical university*, 2021, no. 12 (109), pp. 48-59 (In Russian).
11. Neudorfer H. *Glasers Annalen*, 2001, no. 6/7, pp. 237-242.
12. Andreas Steimel. Power-Electronics Issues of Modern Electric Railway Systems. *10<sup>th</sup> International Conference on Development and Application Systems*, Suceava, Romania, May 27 – 29, 2010, Available at: [http://www.dasconference.ro/cd2010/data/papers/0\\_steimel.pdf](http://www.dasconference.ro/cd2010/data/papers/0_steimel.pdf) (accessed 06.09.2024).
13. Vasile Hoancă, Toma Dordea, Ștefan Păun et al. Direct-drive induction motor for railway traction applications. *Proc. of Romanian Academy, Series A. – Timișoara*, 2011, vol. 12, no. 3, pp. 239-248.
14. Josef Kolar. Design of a Wheelset Drive. *Transactions on Electrical Engineering*, vol. 4 (2015), no. 1, pp. 11-19.
15. Endo T. *Railway Gazette International*, 2002, no. 4, pp. 201-203.
16. Andreas Steimel. Electric Traction - Motion Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrieverlag GmbH (November 16, 2007), 330 p.
17. Antipin D.Ya., Vorob'ev V.I., Bondarenko D.A., Izmerov O.V., Pugachev A.A., Kosmodamianskiy A.S., Novikov V.G. *Patent RU 163517 B61C 9/38, H02K 21/00, H02K 29/06*, 20.07.2016.
18. Antipin D.YA., Izmerov O.V., Nadtochey D.G. The search for rational undercarriage locomotive with increased axle load. *Trudy rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia – Proceedings of the Rostov state transport university*, 2018, no. 4, pp. 9-11 (In Russian).
19. Kosmodamianskiy A.S., Vorobyov V.I., Izmerov O.V., Kopylov S.O., Nikolaev E.V. Problems of creating diesel locomotives for lines with low traffic volume. *Nauka i tekhnika transporta – Science and Technology in Transport*, 2023, no. 2, pp. 22-31 (In Russian).
20. Kosmodamianskiy A.S., Vorob'ev V.I., Kapustin M.Yu., Izmerov O.V., Shevchenko D.N. Problems of creating a promising biaxial bogie of a shunting diesel locomotive. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2020, vol. 79, no. 3, pp. 161-170 (In Russian).
21. Vorobyov V.I., Pugachev A.A., Izmerov O.V., Nikolaev E.V. Search for rational engineering solutions of diesel locomotives for the Eastern range. *Vestnik brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Bryansk state technical university*, 2021, no. 10 (107), pp. 53-63 (In Russian).
22. Litvinov A.T., Akishin E.P., Verber F.G., Lysak V.A., Avramenko V.S., Vlasov V.I., Izmerov O.V., Kochergin V.V. Dynamic loads in the traction drive of a diesel locomotive. *Rezultaty ispytaniy teplovoza 2TJe121: Trudy VNITI – Test results of diesel locomotive 2TE121: The works of VNITI, Kolomna*, 1985, no. 62, pp. 119-130 (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Космодамианский Андрей Сергеевич**

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Часовая ул., д. 22/2, г. Москва, 125993, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав», РОАТ РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 649-19-00.

E-mail: askosm@mail.ru

### **Воробьев Владимир Иванович**

Брянский государственный технический университет (БГТУ (БИТМ)).

Б-р 50 лет Октября, д. 7, г. Брянск, 241035, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», БГТУ (БИТМ).

Тел.: +7 (483) 258-83-32.

E-mail: vladimvorob@yandex.ru

### **Измеров Олег Васильевич**

Брянский государственный технический университет (БГТУ (БИТМ)).

Б-р 50 лет Октября, д. 7, г. Брянск, 241035, Российская Федерация.

Соискатель кафедры «Подвижной состав железных дорог», БГТУ (БИТМ).

Тел.: +7 (483) 266-26-11.

E-mail: izmerov@yandex.ru

### **Карпов Артем Евгеньевич**

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Часовая ул., д. 22/2, г. Москва, 125993, Российская Федерация.

Ассистент кафедры «Тяговый подвижной состав», РОАТ РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (999) 606-08-40.

E-mail: akarpov576@gmail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Техническая инновационика и ее применение в транспортном машиностроении / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, А. Е. Карпов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 3 (59). – С. 21 – 32.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Kosmodamiansky Andrey Sergeevich**

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

22/2, Chasovaya st., Moscow, 125993, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, head of the department «Traction rolling stock», ROAT RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 649-19-00.

E-mail: askosm@mail.ru

### **Vorobyov Vladimir Ivanovich**

Bryansk State Technical University (BSTU (BITM)).

7, 50 Let Oktyabrya Blvd., Bryansk, 241035, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, docent, associate professor of the department «Rolling stock of Railways», BSTU (BITM).

Phone: +7 (483) 258-83-32.

E-mail: vladimvorob@yandex.ru

### **Izmerov Oleg Vasilievich**

Bryansk State Technical University (BSTU (BITM)).

7, 50 Let Oktyabrya Blvd., Bryansk, 241035, the Russian Federation.

Applicant of the department «Rolling stock of Railways», BSTU (BITM).

Phone: +7 (483) 266-26-11.

E-mail: izmerov@yandex.ru

### **Karpov Artem Evgenievich**

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

22/2, Chasovaya st., Moscow, 125993, the Russian Federation.

Assistant of the department «Traction rolling stock», ROAT RUT (MIIT).

Phone: +7 (999) 606-08-40.

E-mail: akarpov576@gmail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kosmodamiansky A.S., Vorobyov V.I., Izmerov O.V., Karpov A.E. Technical innovation and its application in transport engineering. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 3 (59), pp. 21-32 (In Russian).

И. И. Галиев<sup>1</sup>, А. Г. Петракова<sup>1</sup>, М. Х. Минжасаров<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Российская Федерация

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ БУКСОВЫХ УЗЛОВ

**Аннотация.** В статье представлен анализ причин неисправностей колесных пар грузовых вагонов за 2023 г. Наибольшее количество отказов приходится на дефекты поверхности катания, среди которых превалирует износ в эксплуатации. Решить данную проблему пытались путем модернизации конструкции буксового узла. В настоящее время на сети дорог ОАО «РЖД» используются два типа буксовых узлов: адаптивный и типовой. Основное отличие первых заключается в применении адаптера, который позволяет перераспределить нагрузку с тележки на подшипник. Использование адаптеров с упругими элементами снижает износ, позволяет повысить конструкционную скорость вагона и уменьшает его воздействие на путь. Для анализа влияния конструктивного исполнения адаптера буксового узла были рассмотрены колебания в системе «вагон – путь» в процессе ее движения. Для определения показателей динамических качеств вдоль вертикальной оси, а также сил взаимодействия колеса и рельса использовалась модель условного одноосного железнодорожного экипажа. В целях сравнительного анализа ролей типового и адаптерного буксовых узлов изменялись параметры упругодиссипативной связи между боковой рамой и колесной парой. На основе принципа Даламбера сформирована система дифференциальных уравнений, описывающих колебания узлов вагона, решение которых методом Крамера позволило доказать, что применение в конструкции грузового вагона адаптерного буксового узла позволяет снизить нагруженность боковых рам, уменьшить виброускорения кузова вагона и снизить динамическое воздействие на путь.

**Ключевые слова:** грузовой вагон, колесная пара, буксовый узел, кассетные подшипники, адаптер, система «вагон – путь», колебания железнодорожного экипажа, расчетная схема, математическая модель.

Ikhkam I. Galiev<sup>1</sup>, Anna G. Petrakova<sup>1</sup>, Marat Kh. Minzhasarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation;

<sup>2</sup>Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, the Russian Federation

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DYNAMIC LOADING OF FREIGHT WAGONS WITH DIFFERENT TYPES OF AXLE BOXES

**Abstract.** The article presents an analysis of the causes of malfunctions of wheel sets of freight cars in 2023. The largest number of failures is due to defects in the rolling surface, among which wear in operation prevails. They tried to solve this problem by modernizing the design of the axle box. At the moment, two types of axle boxes are used on the Russian Railways road network: adaptive and standard. The main difference between the former is the use of an adapter, which allows you to redistribute the load from the trolley to the bearing. The use of adapters with elastic elements reduces wear, increases the structural speed of the wagon and reduces its impact on the track. To analyze the influence of the design of the axle box adapter, fluctuations in the "wagon-way" system during its movement were considered. To determine the indicators of dynamic qualities along the vertical axis, as well as the forces of interaction between the wheel and the rail, a model of a conventional uniaxial railway carriage was used. In order to compare the roles of standard and adapter axle boxes, the parameters of the elastic dissipative coupling between the side frame and the wheelset were changed. Using the D'Alembert principle, a system of differential equations describing the vibrations of the wagon nodes was formed, the solution of which by the Kramer method made it possible to prove that the use of an adapter axle box in the construction of a freight car makes it possible to reduce the load on the side frames, reduce the vibration acceleration of the wagon body and reduce the dynamic impact on the track.

**Keywords:** freight car, pair of wheel, axle box unit, cassette bearings, adapter, car-track system, railway carriage vibrations, design scheme, mathematical model.

Обеспечение безопасности движения поездов является одной из основополагающих задач компании ОАО «РЖД». В этой связи наиболее актуальными становятся вопросы повышения динамических качеств подвижного состава, безопасности движения, а также увеличение межремонтного пробега грузовых вагонов.

## Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В связи с ростом объемов перевозок внесены незначительные изменения в конструкцию тележки и колесной пары, что позволило увеличить осевую нагрузку до 23,5 т, при этом повысился уровень динамических сил, действующих на ходовую часть вагона. Наиболее заметны данные изменения стали в зоне контакта колеса и рельса, что привело к увеличению ряда дефектов на поверхности катания колесных пар. Отсутствие жесткой связи между деталями тележки оказывает негативное влияние на надежность вагона, так как появилась возможность их набегания друг на друга в процессе движения. Данное обстоятельство обусловлено возрастанием колебаний виляния тележки и, как следствие, ухудшает ее динамические качества. Происходит неравномерная передача нагрузок на элементы подшипника колесной пары, его перекокс, грение буксового узла и снижаются долговечность и срок службы деталей буксового узла.

Анализ неисправностей, выявленных в ходе технического обслуживания грузовых поездов, показывает, что наиболее часто неисправности возникают в ходовой части вагона, а именно колесных пар и тележек. Из неисправностей, выявленных на колесных парах, более 90 % составляют дефекты поверхности катания (рисунок 1).



Рисунок 1 – Диаграмма отцепок колесных пар по Беловскому региону за 2023 г.

Из дефектов поверхности катания колес наиболее частым является износ в эксплуатации (рисунок 2). Решением данной проблемы ученые занимаются длительное время и основные исследования направлены на подбор профиля поверхности катания колесных пар, выбор зазоров в конструкции тележки, совершенствование конструкции буксового узла, однако эффективность предлагаемых решений невысока.

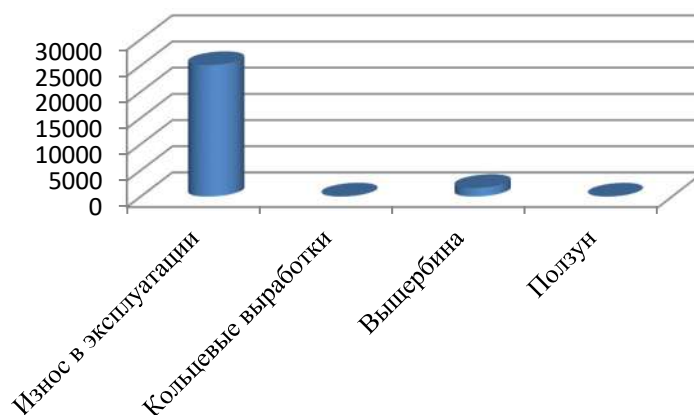


Рисунок 2 – Распределение дефектов поверхности катания, выявленных по Беловскому региону за 2023 г.

В настоящее время эксплуатируются грузовые вагоны с двумя типами буксовых узлов: типовым и адаптерным, главное преимущество последнего заключается в возможности

внедрения в конструкцию экипажной части грузового вагона второй ступени рессорного подвешивания. Появление упругодиссипативных связей между адаптером и боковой рамой позволяет снизить ее динамическую нагруженность, а также уменьшить необрессоренную массу вагона, что, несомненно, приведет к уменьшению сил взаимодействия в трибосистеме «колесо – рельс» и сократит количество дефектов поверхности катания колесной пары.

Рассмотрим более подробно конструктивные особенности типового и адаптерного буксовых узлов. В комплект типового буксового узла входят (рисунок 3): корпус буксы 1 с лабиринтной частью 13, передний 2 и задний 3 подшипники качения, тарельчатая шайба 8 со стопорной шайбой 9 и болты М20 10, крепительная 5 и смотровая 6 крышки и крепящие их болты 12.

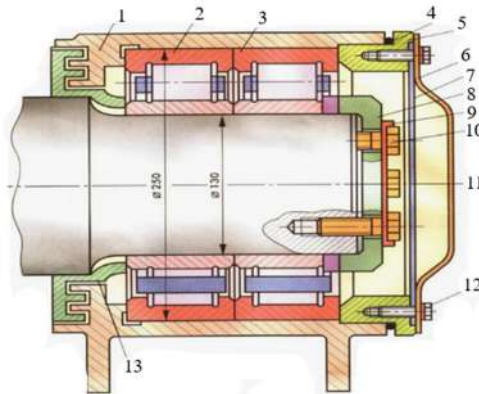


Рисунок 3 – Конструкция типового буксового узла грузового вагона

Роликовые подшипники размещаются внутри корпуса буксы на вагонной оси таким образом, что внутреннее кольцо подшипника напрессовано на шейку и вращается вместе с осью, а наружное сопрягается с внутренними стенками неподвижного корпуса буксы. Поворачиваясь вместе с осью, внутреннее кольцо вовлекает в движение тела качения, каждое из которых вращается вокруг своей оси и перекачивается по дорожкам качения между наружным и внутренним кольцами [1].

Адаптерный буксовый узел является цельной, готовой к установке на шейки вагонных осей сборочной единицей (рисунок 4). В этом узле используются кассетные подшипники, установленные на шейки вагонных осей, которые лучше воспринимают на себя и передают через колеса на рельсы силы тяжести вагона с грузом и динамические нагрузки, появляющиеся при движении вагона, особенно при прохождении кривых участков пути. В этой конструкции роль корпуса выполняет наружное кольцо, а нагрузка с боковой рамы на подшипник передается через адаптер. Адаптер – деталь, предназначенная для свободного размещения на наружном кольце подшипника и передачи нагрузок от тележки на колесную пару [2].



Рисунок 4 – Конструктивное исполнение адаптерного буксового узла



Рисунок 5 – Конструктивное исполнение адаптеров разными производителями

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Основной задачей адаптера является перераспределение нагрузки от тележки на кассетный подшипник. Конструктивно адаптер выполняет роль опорной части обычной буксы и, как и корпус буксы, изготавливается литьем, имеет литьевые приливы, что позволяет ограничить продольные, поперечные и угловые смещения колесной пары относительно рамы тележки. Существуют разные конструктивные исполнения адаптеров кассетных букс (рисунок 5). Это, как правило, связано с заводами-изготовителями.

Сравнительный анализ по основным техническим характеристикам типового и адаптерного буксовых узлов представлен в таблице. Основные преимущества адаптерного буксового узла заключаются в следующем: увеличенный межремонтный пробег, практически в четыре раза, большая грузоподъемность и меньшие габариты.

Технические характеристики буксовых узлов различной конструкции

№ п/п	Технические характеристики	Цилиндрические подшипники	Кассетные подшипники
1	Межремонтный пробег, тыс. км	300	1 200
2	Грузоподъемность, кН: динамическая статическая	584	990
		774	1720
3	Осевой зазор в свободном состоянии, мм	0,07 – 0,15	0,57 – 0,7
4	Тип смазки	ЛЗ ЦНИИ/Буксол	Буксол
5	Габариты, мм	130 × 250 × 80	130 × 230 × 150
6	Масса, кг	18,7	38,5

Анализ работ отечественных ученых подтверждает, что проблема повышения скоростей движения и осевых нагрузок грузовых вагонов на трехэлементных тележках является актуальной [3 – 8]. Уменьшение габаритов адаптерного буксового узла при неизменной конструкции боковой рамы позволяет разместить упругий элемент (рисунки 6, 7), который обеспечивает упругое соединение боковых рам и колесных пар, защиту их от износов, повышает связанность боковых рам тележки в плане, снижает уровень нагруженности боковых рам, а также создает условия установки колесных пар в положение, близкое к радиальному, при движении в кривых участках пути [5 – 8].

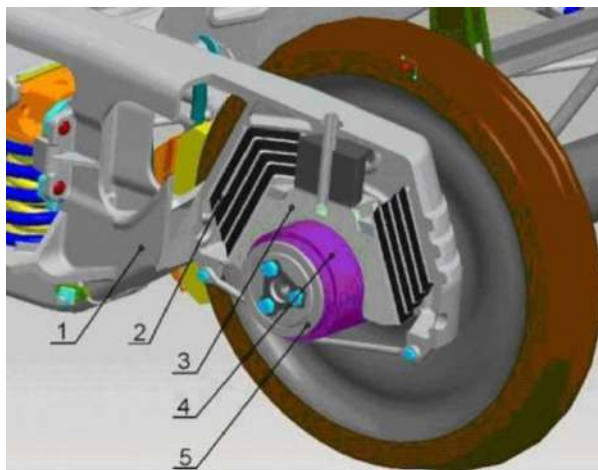


Рисунок 6 – Адаптерный буксовый узел: 1 – боковая рама; 2 – резинометаллические элементы; 3 – адаптер; 4 – подшипник; 5 – колесная пара



Рисунок 7 – Первая ступень подвешивания тележки модели 18-9750 в виде полиуретано-металлических амортизаторов

В работах [3, 4] доказано, что введение упругой связи между колесными парами и боковыми рамами тележек позволяет повысить конструкционную скорость вагона и снижает его воздействие на путь, однако до сих пор такое подвешивание не получило эффективной конструктивной реализации. Анализ работ [3 – 8] позволяет сделать вывод о том, что

актуальными являются исследования по обоснованию конструктивного исполнения первой ступени подвешивания тележек грузовых вагонов, а также в данных работах исследователями уделяется большое внимание определению показателей динамических качеств грузового вагона, таких как максимальные горизонтальные и вертикальные виброускорения и виброперемещения, коэффициенты горизонтальной и вертикальной динамики, однако недостаточно внимания уделено оценке сил взаимодействия колеса и рельса, уровень которых определяет надежность элементов трибосистемы «колесо – рельс».

Для определения сил взаимодействия колеса и рельса необходимо рассмотреть колебания системы «вагон – путь» в процессе ее движения. Важной особенностью динамики железнодорожных экипажей является случайный характер внешних возмущений, которые математически описываются случайной функцией. В теории случайных процессов пользуются статистическими характеристиками, которые являются не числами, а функциями, причем неслучайными. Для стационарных случайных процессов такими характеристиками являются корреляционная функция и спектральная плотность [9].

В настоящее время не существует единой точки зрения относительно математической модели внешнего возмущения. Теоретическому и экспериментальному изучению возмущений, действующих на рельсовые экипажи со стороны пути, посвящены работы отечественных и зарубежных ученых. При этом делались многочисленные попытки описания экспериментальных данных о возмущениях с помощью аналитических выражений. Однако поскольку эксперименты проводились в разных условиях (например, различное состояние участков железных дорог и подвижного состава, отличающиеся по конструкции экипажи, неодинаковые погодные условия) и с использованием различных методик, то полученные при этом результаты в ряде случаев существенно отличаются друг от друга. Это иногда затрудняет их использование при теоретических исследованиях колебаний рельсовых экипажей. В данной работе используется выражение спектральной плотности внешнего возмущения (рисунок 8), предложенное профессором А. Н. Савоськиным [10, 11]:

$$S_z(\omega, V) = \frac{S_\eta^2}{2\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{c_i V} \left\{ \exp \left[ -\frac{(\omega - b_i V)^2}{4c_i^2 V^2} \right] + \exp \left[ -\frac{(\omega + b_i V)^2}{4c_i^2 V^2} \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $S_\eta^2$  – дисперсия эквивалентной геометрической неровности;  $a_i$  – доля дисперсии случайного процесса, приходящаяся на  $i$ -й максимум спектральной плотности;  $c_i$  – половина ширины  $i$ -го максимума на половине его высоты;  $b_i$  – частота  $i$ -го максимума функции спектральной плотности;  $V$  – скорость движения, м/с;  $i = 1, 2, \dots, n$  – количество одновершинных составляющих функции спектральной плотности ( $n = 4$ );  $\omega$  – частота.

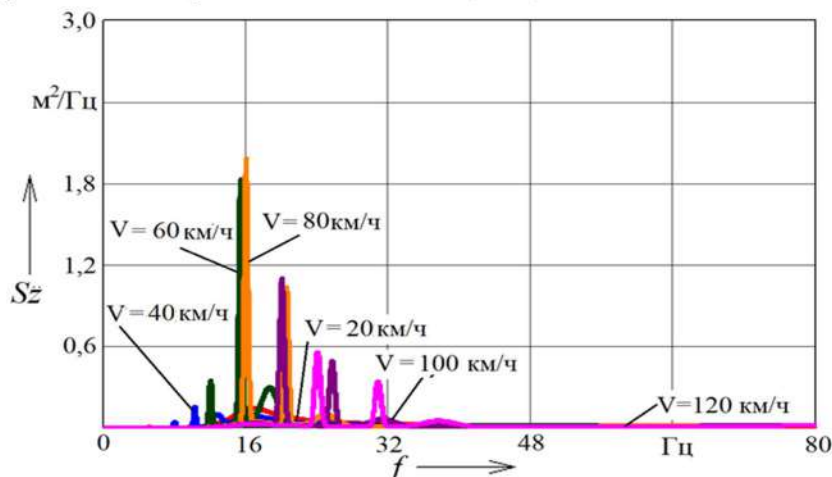


Рисунок 8 – Функции спектральной плотности эквивалентной геометрической неровности

На основании выражения (1) в программе MathCAD построены графики функции спектральной плотности эквивалентной геометрической неровности для летнего периода при хорошем состоянии пути и скоростях движения от 20 до 120 км/ч (см. рисунок 8).

В исследованиях вертикальных колебаний грузовых вагонов необходимо учитывать доминирующие особенности реальной системы, приняв следующие допущения для упрощения расчетной модели (рисунок 9).

1. Кузов, боковые рамы, колесные пары считаются твердыми телами, так как их жесткость многократно превышает жесткость упругих элементов системы.

2. В качестве упругих элементов в центральной ступени грузовых вагонов применяются цилиндрические пружины, отличающиеся по высоте, что позволяет получить билинейную силовую характеристику, каждый участок которой предназначен для работы в груженом или порожнем режимах соответственно.

3. В качестве упругих элементов буксовой ступени применяются полиуретано-металлические амортизаторы или резинометаллические элементы, которые совмещают в себе упругие и диссипативные свойства, следовательно, их считаем упругодиссипативной связью.

4. В рессорном подвешивании грузового вагона применяются демпферы сухого трения с нелинейными силовыми характеристиками, для линеаризации которых используется принцип энергетического баланса, в соответствии с ним вводится эквивалентное вязкое трение, определяемое через равенство работ, совершаемых демпфером, и вязким трением на периоде колебания.

5. Движение колесных пар по рельсам считаем безотрывным, что не всегда соответствует действительности, однако позволяет применять методику формирования дифференциальных уравнений, основанную на уравнении Лагранжа второго рода или принципе Даламбера.

6. Рельсовое основание представлено в виде приведенной массы пути с упругими и диссипативными связями (погрешность не более 12 %) [12].

7. Колебания считаются малыми, что позволяет допустить, что в расчетах  $\sin \varphi \approx \varphi$ .

8. Возмущение, действующее на экипаж, является случайным.

Следовательно, для определения показателей динамических качеств в вертикальном направлении, а также сил взаимодействия колеса и рельса достаточно использовать модель условного одноосного железнодорожного экипажа [13], при этом для проведения сравнительного анализа грузового вагона с типовым и адаптерным буксовыми узлами достаточно изменять параметры упругодиссипативной связи между боковой рамой и колесной парой. В случае типового буксового узла вагон будет иметь одноступенчатое рессорное подвешивание, появление в конструкции упругого элемента над адаптером приводит к появлению полноценной второй ступени подвешивания, при этом груз, который находится между кузовом и колесной парой, будет описывать колебания боковой рамы. Для исследования грузового и порожнего режимов движения вагонов достаточно менять соответствующие инерционные и упругодиссипативные параметры системы, а именно массу кузова и жесткость упругого элемента центральной ступени. Особенность модели заключается в том, что все параметры экипажной части, а также пути приведены к одной колесной паре, что отражено в расчетной схеме. Фактически приведенная модель является частным случаем плоской модели, если считать воздействие пути как сосредоточенное или, другими словами, оказывающее одинаковое влияние на все колесные пары в определенный момент времени.

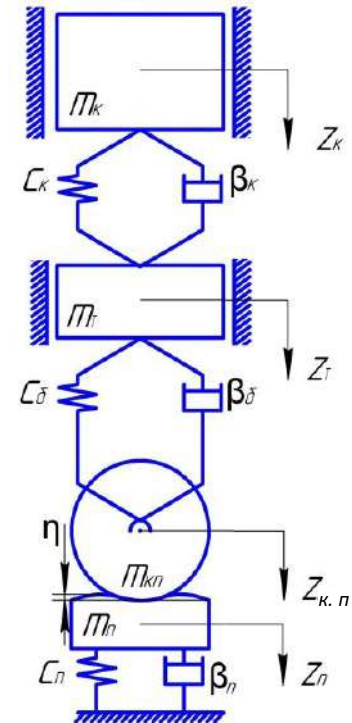


Рисунок 9 – Расчетная схема условного одноосного экипажа

Простота модели определяется в большей мере числом степеней свободы. При составлении моделей нужно стремиться к минимизации числа степеней свободы системы, но имея в виду то, что это приведет к увеличению погрешностей расчета. Оптимизация числа степеней свободы системы возможна как на стадии составления расчетной схемы, как это приведено в работе [14], так и после составления дифференциальных уравнений, в частности, методикой эквивалентного преобразования систем дифференциальных уравнений [15].

Для проведения расчета обозначим необходимые параметры и обобщенные координаты, которые представлены на рисунке 9:  $z_k$  – вертикальное перемещение кузова;  $z_T$  – вертикальное перемещение боковой рамы;  $z_{к.п}$  – вертикальные колебания колесной пары;  $z_{п}$  – вертикальные колебания участка пути, приведенного к колесной паре;  $\eta$  – случайная функция неровности рельса под колесной парой;  $m_k$  – масса кузова;  $m_T$  – масса боковой рамы;  $m_{к.п}$  – масса колесной пары;  $m_{п}$  – приведенная масса пути;  $c_k$  – жесткость центральной ступени подвешивания;  $c_б$  – жесткость буксовой ступени подвешивания;  $c_{п}$  – приведенная жесткость пути;  $\beta_k$  – коэффициент вязкого трения центральной ступени подвешивания;  $\beta_б$  – коэффициент вязкого трения буксовой ступени подвешивания;  $\beta_{п}$  – приведенный коэффициент вязкого трения пути.

Используя принцип Даламбера, формируем систему дифференциальных уравнений, описывающих колебания узлов вагона: кузова, боковой рамы и колесной пары:

$$\begin{cases} m_k \ddot{z}_k + \beta_k (\dot{z}_k - \dot{z}_T) + c_k (z_k - z_T) = 0; \\ m_T \ddot{z}_T + \beta_k (\dot{z}_T - \dot{z}_k) + \beta_б (\dot{z}_T - \dot{z}_{к.п}) + c_k (z_T - z_k) + c_б (z_T - z_{к.п}) = 0; \\ (m_{к.п} + m_{п}) \ddot{z}_{к.п} + \beta_б (\dot{z}_{к.п} - \dot{z}_T) + \beta_{п} \dot{z}_{к.п} + c_б (z_{к.п} - z_T) + c_{п} z_{к.п} = m_{п} \sum_{j=1}^4 \ddot{\eta}_j + \beta_{п} \sum_{j=1}^4 \dot{\eta}_j + c_{п} \sum_{j=1}^4 \eta_j. \end{cases} \quad (2)$$

Так как на вагон оказывают воздействие случайные возмущения, то решение системы необходимо проводить в частотной области на основе перехода к передаточным функциям. Для определения передаточных функций произведем преобразование системы (2) по Лапласу:

$$\begin{cases} (m_k s^2 + \beta_k s + c_k) Z_k(s) - (\beta_k s + c_k) Z_T(s) = 0; \\ (m_T s^2 + (\beta_k + \beta_б) s + (c_k + c_б)) Z_T(s) - (\beta_k s + c_k) Z_k(s) - (\beta_б s + c_б) Z_{к.п}(s) = 0; \\ ((m_{к.п} + m_{п}) s^2 + (\beta_{п} + \beta_б) s + c_б + c_{п}) Z_{к.п}(s) - (\beta_б s + c_б) Z_T(s) = (m_{п} s^2 + \beta_{п} s + c_{п}) H(s), \end{cases} \quad (3)$$

где  $s$  – оператор передаточной функции в преобразовании Лапласа.

Решим систему уравнений (3) методом Крамера. Введем вектор неизвестных обобщенных координат для системы (3) следующим образом:

$$\vec{Z}(s) = \begin{pmatrix} Z_k(s) \\ Z_T(s) \\ Z_{к.п}(s) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Далее составим матрицу из коэффициентов при обобщенных координатах:

$$\vec{A}(s) = \begin{pmatrix} (m_k s^2 + \beta_k s + c_k) & -(\beta_k s + c_k) & 0 \\ -(\beta_k s + c_k) & (m_t s^2 + (\beta_k + \beta_\sigma) s + (c_k + c_\sigma)) & -(\beta_\sigma s + c_\sigma) \\ 0 & -(\beta_\sigma s + c_\sigma) & ((m_{к.п} + m_{п}) s^2 + (\beta_\sigma + \beta_{п}) s + c_\sigma + c_{п}) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Умножая матрицу  $\vec{A}(s)$  на вектор  $\vec{Z}(s)$ , получим вектор, строки которого содержат левую часть уравнения (3), т. е. систему можно представить в матричном виде:

$$\vec{A}(s) \cdot \vec{Z}(s) = \vec{B}(s), \quad (6)$$

где  $\vec{B}(s) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ (m_{п} s^2 + \beta_{п} s + c_{п}) H(s) \end{pmatrix}$ .

Введем в рассмотрение вектор передаточных функций обобщенных координат:

$$\vec{W}(s) = \frac{\vec{Z}(s)}{\vec{H}(s)} = \begin{pmatrix} \vec{W}_{Z_k}(s) \\ \vec{W}_{Z_t}(s) \\ \vec{W}_{Z_{к.п}}(s) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Зная передаточные функции, можно оценить спектральные плотности и средне-квадратические отклонения «обобщенных» координат заданной механической системы «экипаж – железнодорожный путь» при известной спектральной плотности входного возмущения:

$$\begin{cases} S_{Z_k}(\omega) = |W_{Z_k}(j\omega)|^2 S_\eta(\omega); \\ S_{Z_t}(\omega) = |W_{Z_t}(j\omega)|^2 S_\eta(\omega); \\ S_{Z_{к.п}}(\omega) = |W_{Z_{к.п}}(j\omega)|^2 S_\eta(\omega). \end{cases} \quad (8)$$

Кроме указанных выше характеристик нас будут интересовать ускорения подпрыгивания кузова, боковой рамы, колесных пар, характеризующих уровень динамических сил, действующих на узлы вагона:

$$\begin{cases} S_{\ddot{Z}_k}(\omega) = |W_{Z_k}(j\omega)|^2 S_\eta(\omega) \cdot \omega^4; \\ S_{\ddot{Z}_t}(\omega) = |W_{Z_t}(j\omega)|^2 S_\eta(\omega) \cdot \omega^4; \\ S_{\ddot{Z}_{к.п}}(\omega) = |W_{Z_{к.п}}(j\omega)|^2 S_\eta(\omega) \cdot \omega^4. \end{cases} \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{\dot{z}_k} &= \sqrt{2 \int_0^{\infty} S_{\dot{z}_k}(\omega) d\omega}; \\ \sigma_{\dot{z}_t} &= \sqrt{2 \int_0^{\infty} S_{\dot{z}_t}(\omega) d\omega}; \\ \sigma_{\dot{z}_{к.п}} &= \sqrt{2 \int_0^{\infty} S_{\dot{z}_{к.п}}(\omega) d\omega}. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Полученные выражения (7) – (10) позволяют провести соответствующие расчеты. Вычисления выполнялись для летнего периода года, хорошего состояния пути и с учетом параметров грузового вагона с типовым и адаптерным буксовыми узлами. На рисунках 10 – 15 представлены результаты расчетов, анализ которых доказывает, что применение в конструкции грузовых вагонов кассетных подшипников позволяет провести более глубокую модернизацию экипажной части грузовых вагонов за счет появления дополнительной ступени рессорного подвешивания.

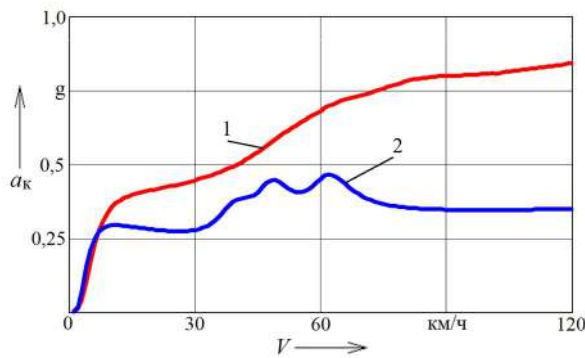


Рисунок 10 – Виброускорения кузова грузового вагона (груженный режим): 1 – с типовым буксовым узлом; 2 – с адаптерным буксовым узлом

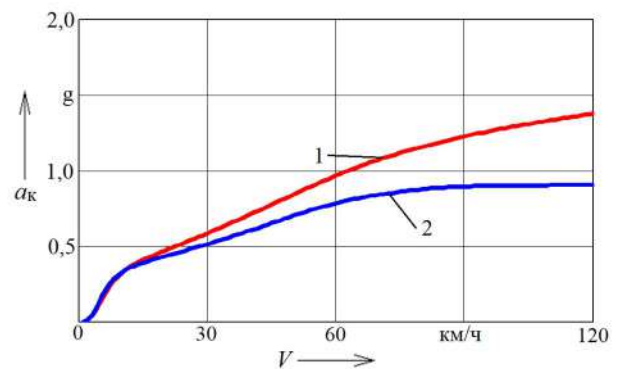


Рисунок 11 – Виброускорения кузова грузового вагона (порожний режим): 1 – с типовым буксовым узлом; 2 – с адаптерным буксовым узлом

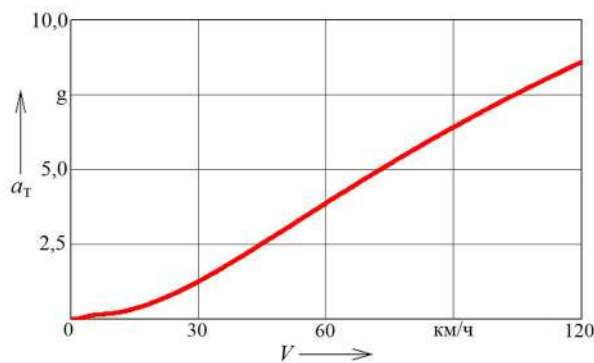


Рисунок 12 – Виброускорения боковой рамы грузового вагона (груженный режим):

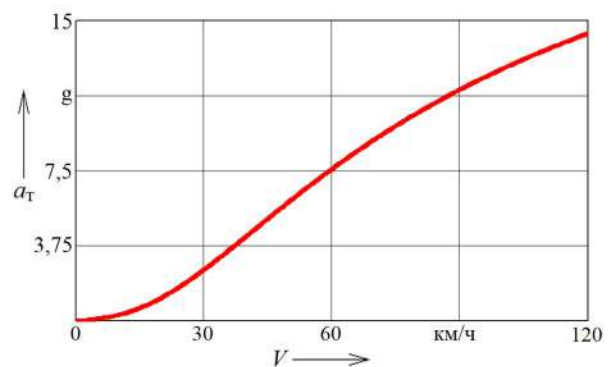


Рисунок 13 – Виброускорения боковой рамы грузового вагона (порожний режим)

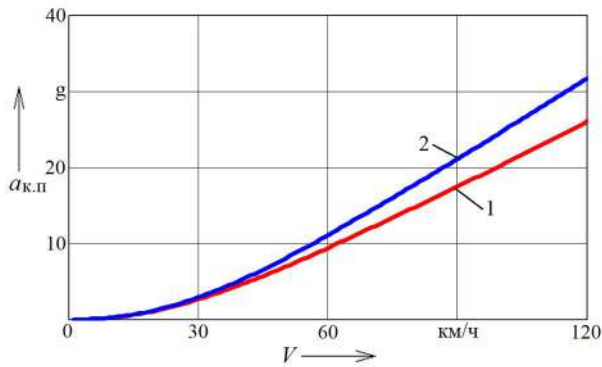


Рисунок 14 – Виброускорения колесной пары грузового вагона (грузовой режим): 1 – с типовым буксовым узлом; 2 – с адаптерным буксовым узлом

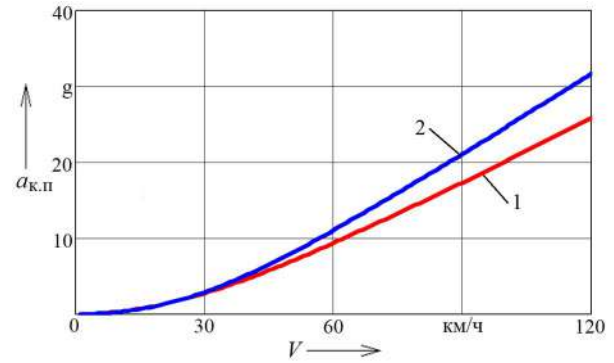


Рисунок 15 – Виброускорения колесной пары грузового вагона (порожний режим): 1 – с типовым буксовым узлом; 2 – с адаптерным буксовым узлом

Определим передаточную функцию для динамической добавки давления колеса на путь. Передаточная функция определяется с помощью третьего уравнения системы (3), в котором нужно правую часть заменить на  $-P_p$ , а в левой части все параметры принять равными нулю, тогда имеем:

$$P(s) = -[m_{к.п}s^2 + \beta_6s + c_6]z_{к.п}(s) + (\beta_6s + c_6z_T)(s), \quad (11)$$

Используя соотношения

$$\begin{cases} z_{к.п}(s) = W_{Z_{к.п}}(j\omega)\eta(s); \\ z_T(s) = W_{Z_T}(j\omega)\eta(s), \end{cases} \quad (12)$$

определим передаточную функцию динамической добавки:

$$\frac{P(s)}{\eta(s)} = W_p(s) = -[m_{к.п}s^2 + \beta_6s + c_6]W_{Z_{к.п}}(s) + (\beta_6s + c_6z_T)W_{Z_T}(s). \quad (13)$$

Спектральная плотность и среднеквадратическое отклонение динамической добавки определяются так:

$$\begin{cases} S_p(\omega) = |W_p(j\omega)|^2 S_\eta(\omega); \\ \sigma_p = \sqrt{2 \int_0^\infty S_p(\omega) d\omega}. \end{cases} \quad (14)$$

Результаты расчетов представлены на рисунках 16, 17. Верификация данных, полученных при моделировании, является немаловажной составляющей любого исследования. Полученные в результате расчета значения показателей динамических качеств грузового вагона необходимо сравнить с результатами натурных испытаний. Для сравнительного анализа теоретических и экспериментальных данных были использованы полученные в АО «ВНИКТИ» результаты ходовых динамико-прочностных испытаний четырех опытных грузовых вагонов, вагона-цистерны на тележках с кассетными подшипниками и вагона-эталона на тележках по ГОСТ 9246–2013, тип 2 в составе грузового поезда по маршруту Татарск – Хабаровск и обратно [16], на основе которых можно заключить, что предложенная модель адекватно описывает колебания грузового вагона.

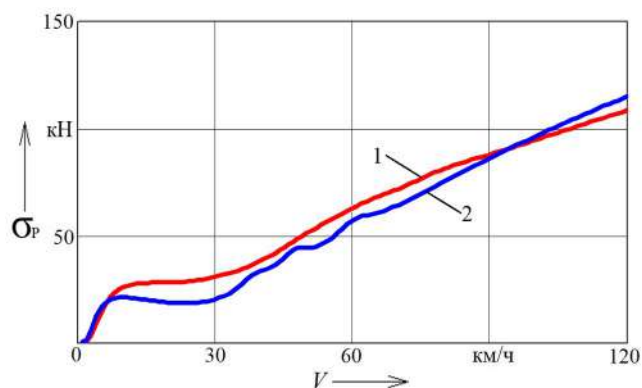


Рисунок 16 – Среднеквадратическое отклонение динамической добавки давления колеса на рельс (грузовой режим): 1 – с типовым буксовым узлом; 2 – с адаптерным буксовым узлом

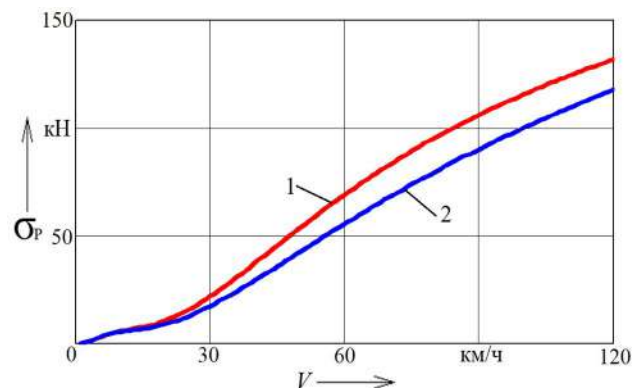


Рисунок 17 – Среднеквадратическое отклонение динамической добавки давления колеса на рельс (порожний режим): 1 – с типовым буксовым узлом; 2 – с адаптерным буксовым узлом

Таким образом, на основе проведенного расчета можно заключить, что применение в конструкции грузового вагона адаптерного буксового узла имеет ряд преимуществ перед типовой конструкцией:

1) снижаются виброускорения кузова, например, при скоростях движения от 90 до 120 км/ч в два раза для груженого режима, что обеспечит сохранность перевозимых грузов, а также позволит увеличить скорость движения поезда;

2) достигается снижение уровня нагруженности боковых рам. Так, согласно результатам расчетов вертикальные виброускорения в груженом режиме уменьшаются в три раза, что повышает надежность в эксплуатации;

3) снижается динамическая составляющая сил взаимодействия колеса и рельса в порожнем режиме, что позволит уменьшить напряжения в пятне контакта и сократить количество дефектов поверхности катания колес.

### Список литературы

1. Быков, Б. В. Конструкция механической части вагонов / Б. В. Быков, В. Ф. Куликов. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2016. – 247 с. – Текст : непосредственный.
2. Морчиладзе, И. Г. Совершенствование и модернизация буксовых узлов грузовых вагонов / И. Г. Морчиладзе, А. М. Соколов. – Текст : непосредственный // Железные дороги мира. – 2006. – № 10 – С. 59–64.
3. Выбор конструкции первой ступени подвешивания трехэлементных тележек инновационных грузовых вагонов / М. А. Орлова, Е. А. Рудакова, И. В. Турутин, А. В. Саидова. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2011. – № 3 (28). – С. 88–99.
4. Создание тележки с самоцентрирующимися колесными парами на базе трехэлементной рамы / Ю. П. Бороненко, В. М. Бубнов, А. М. Орлова, Е. А. Рудакова. – Текст : непосредственный // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты : сб. науч. статей. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения, 2005. – С. 27–32.
5. Тележка для грузовых вагонов нового поколения с повышенными осевыми нагрузками / В. П. Ефимов, А. А. Пранов, А. Н. Баранов, К. А. Белоусов. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 6. – С. 58–61.
6. Бороненко, Ю. П. Тележки с повышенной осевой нагрузкой / Ю. П. Бороненко, А. М. Орлова. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 10. – С. 50–54.
7. Коссов, В. С. Тележка с осевой нагрузкой 25 тс для грузового вагона нового поколения / В. С. Коссов, В. А. Чаркин, Л. К. Добрынин [и др.]. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 7. – С. 55–58.

8. Ефимов, В. П. Исследование влияния упругой вставки адаптера на усталостную прочность боковой рамы тележки модели 18-194-1 / В. П. Ефимов, А. Н. Баранов, С. М. Буторин. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2015. – № 3 (58). – С. 75–77.

9. Галиев, И. И. Научные направления школы М. П. Пахомова за 50 лет (1961 – 2011) : монография / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2012. – 171 с. – Текст : непосредственный.

10. Механическая часть тягового подвижного состава / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак [и др.]; Под ред. И. В. Бирюкова. – Москва : Транспорт, 1992. – 440 с. – Текст : непосредственный.

11. Трофимович, В. В. Основы механики подвижного состава / В. В. Трофимович. – Хабаровск : Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2018. – Ч. 1. – 116 с. – Текст : непосредственный.

12. Камаев, В. А. Оптимизация параметров ходовых частей железнодорожного подвижного состава / В. А. Камаев. – Москва : Машиностроение, 1980. – 215 с. – Текст : непосредственный.

13. Вершинский, С. В. Динамика вагона / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, И. И. Челноков. – Москва : Транспорт, 1978. – 352 с. – Текст : непосредственный.

14. Ахмадеева, А. А. Рациональное задание числа степеней свободы динамической модели грузового вагона / А. А. Ахмадеева, В. Е. Гозбенко. – Текст : непосредственный // Системы. Методы. Технологии. – 2011. – № 4 (12). – С. 25–28.

15. Хохлов, А. А. Динамика сложных механических систем / А. А. Хохлов. – Москва : Московский гос. ун-т путей сообщения (МИИТ), 2002. – 172 с. – Текст : непосредственный.

16. ИЦ ПС(3) П892. Испытания вагонов на тележках по ГОСТ 9246–2013, тип 2, оборудованных подшипниками кассетного типа с адаптерами. Программа испытаний. – Москва : ОАО «РЖД», 2019. – 36 с. – Текст : непосредственный.

### References

1. Bykov B.V., Kulikov V.F. *Konstruktsiia mekhanicheskoi chasti vagonov* [Designs of the mechanical part of cars]. Moscow, Educational and Methodological Center for education in railway transport Publ., 2016, 247 p. (In Russian).

2. Morchiladze I.G., Sokolov A.M. Improvement and modernization axle boxes for freight cars. *Zheleznnye dorogi mira – Railways of the world*, 2006, no. 10, pp. 59-64 (In Russian).

3. Orlova A.M., Rudakova E.A., Turutin I.V., Saidova A.V. The choice of the design of the three-piece bogie primary suspension for innovative freight cars. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia – Proceedings of Petersburg transport university*, 2011, no. 3 (28), pp. 88-99 (In Russian).

4. Boronenko Yu.P., Bubnov V.M., Orlova A.M., Rudakova E.A. Creation of a trolley with self-centering wheel pairs based on a three-element frame. *Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects : the collection of scientific works*. St. Petersburg, St. Petersburg State Transport University Publ., 2005, pp. 27-32 (In Russian).

5. Efimov V.P., Pranov A.A., Baranov A.N., Belousov K.A. Trolley for trucks new generation wagons with increased axial loads. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway transport*, 2009, no. 6, pp. 58-61 (In Russian).

6. Boronenko Yu.P., Orlova A.M. Bogies with increased axial load. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway transport*, 2008, no. 10, pp. 50-54 (In Russian).

7. Kossov V.S., Charkin V.A., Dobrynin L.K., Meshcherin Yu.V., Ogan"ian E.S., Oguenko V.N., Berezin V.V., Sorochkin E.M., Panin Iu.A., Tkachenko V.N., Krasiukov N.F., Shevchenko V.G., Stavrova E.K. Trolley with an axial load of 25 tons-forces for a new generation freight car. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway transport*, 2008, no. 7, pp. 55-58 (In Russian).

8. Yefimov V.P., Baranov A.N., Butorin S.M. Exploration of the influence of elastic adapter insert on fatigue strength of 18-194-1 model bogie side frame. *Transport Rossiiskoi Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike – Transport of the Russian Federation. Journal of Science, Practice, Economics*, 2015, no. 3 (58), pp. 75-77 (In Russian).

9. Galiev I.I., Nekhaev V.A., Nikolaev V.A. *Nauchnye napravleniia shkoly M. P. Pakhomova za 50 let (1961 – 2011): monografiia* [Scientific directions of the M. P. Pakhomov school for 50 years (1961-2011) : a monograph]. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2012, 171 p. (In Russian).

10. Biryukov I.V., Savos'kin A.N., Burchak G.P. et al., Biryukov I.V. ed. *Mekhanicheskaiia chast' tiagovogo podvizhnogo sostava* [Mechanical part of traction rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1992, 440 p. (In Russian).
11. Trofimovich V.V. *Osnovy mekhaniki podvizhnogo sostava* [Fundamentals of rolling stock mechanics]. Khabarovsk, Far Eastern State Transport University Publ., 2018, Part 1, 116 p. (In Russian).
12. Kamaev V.A. *Optimizatsiia parametrov khodovykh chastei zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Optimization of the parameters of the running gear of railway rolling stock]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 215 p. (In Russian).
13. Vershinskii S.V., Danilov V.N., Chelnokov I.I. *Dinamika vagona* [Dynamics of the wagon]. Moscow, Transport Publ., 1978, 352 p. (In Russian).
14. Akhmadeeva A.A., Gozbenko V.E. Substantiation of transition from the system with six freedom degrees to the system with two degrees of freedom. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2011, no. 4 (12), pp. 25-28 (In Russian).
15. Khokhlov A.A. *Dinamika slozhnykh mekhanicheskikh sistem* [Dynamics of complex mechanical systems]. Moscow, Moscow State Transport University Publ., 2002, 172 p. (In Russian).
16. IC PS(3) P892. Tests of wagon son trolleys according to GOST 9246-2013 type 2, equipped cassette type bearings with adapters. The testprogram. Moscow, JSCo «RZD» Publ., 2019, 36 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 ОмГУПСа, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика».

Тел.: +7 (3812) 31-16-09.

E-mail: Prezident@omgups.ru

### Петракова Анна Геннадьевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

Тел.: +7 (913) 682-55-36.

E-mail: petra-anna@yandex.ru

### Минжасаров Марат Хайргельдаевич

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и робототехника», ОмГТУ.

Тел.: +7 (999) 456-85-39.

E-mail: mmx90@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Галиев, И. И. Сравнительный анализ динамической нагруженности грузовых вагонов с различными типами буксовых узлов / И. И. Галиев, А. Г. Петракова, М. Х. Минжасаров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 3 (59). – С. 33 – 45.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Galiev Ilkham 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

### Petrakova Anna Gennadijevna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Wagons and wagon facilities», OSTU.

Phone: +7 (913) 682-55-36.

E-mail: petra-anna@yandex.ru

### Minzhasarov Marat Khajergeldajevich

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira av., Omsk, 644050, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Automation and robotics», OSTU.

Phone: +7 (999) 456-85-39.

E-mail: mmx90@yandex.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Galiev I.I., Petrakova A.G., Minzhasarov M.Kh. Comparative analysis of the dynamic loading of freight wagons with different types of axle boxes. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 3 (59), pp. 33-45 (In Russian).

УДК 621.331:621.311; 629.423

**М. М. Никифоров**

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

## МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТЬ ТЯГИ ПОЕЗДОВ

**Аннотация.** Статья посвящена разработке методологии оценки энергетической безопасности электротяги поездов при внедрении энергосберегающих мероприятий, направленных на снижение уровня потерь (небаланса) электроэнергии.

Рассмотрено понятие «энергетическая безопасность» применительно к железнодорожному транспорту. Показано, что с учетом сложившегося в ОАО «Российские железные дороги» энергопотребления и объемов выполняемой перевозочной работы наиболее важным является обеспечение энергетической безопасности электротяги поездов. Обоснована необходимость доработки существующей нормативно-методической базы для определения технического и экономического эффекта от внедрения энергосберегающих мероприятий. Представлены общие принципы расчета ожидаемого эффекта до внедрения мероприятия и эффекта за отчетный период после внедрения мероприятия. Приведена классификация способов определения эффекта от внедрения энергосберегающих мероприятий и выделена группа мероприятий, направленных на снижения расхода и потерь электроэнергии на тягу поездов, для оценки эффекта от которых требуется применение имитационного моделирования или статистических методов регрессионного анализа на основе сбора и обработки данных за несколько лет. Составлен перечень эксплуатационных факторов, оказывающих наибольшее влияние на уровень потерь электроэнергии на тягу поездов.

На основании результатов имитационного моделирования и обработки статистической выборки с применением регрессионного анализа предложены две регрессионные зависимости, позволяющие оценить влияние внешних факторов на уровень потерь электроэнергии на тягу поездов.

Применение полученных результатов позволит повысить точность определения эффекта от внедрения энергосберегающих мероприятий, направленных на снижение уровня потерь электроэнергии на тягу поездов и, следовательно, точность определения существующего уровня энергобезопасности электротяги поездов.

**Ключевые слова:** энергетическая безопасность, энергетическая эффективность, электротяги поездов, энергосберегающие мероприятия, потери (небаланс) электроэнергии.

**Mikhail M. Nikiforov**

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

## METHODOLOGY FOR ASSESSING THE IMPACT OF ENERGY-SAVING MEASURES TO REDUCE ELECTRICITY LOSSES ON THE ENERGY SAFETY OF TRAIN TRACTION

**Abstract.** The article is devoted to the development of methodological approaches to assessing the energy safety of train electric traction. In particular, to determining the methodology for assessing the impact of energy-saving measures aimed at reducing the level of losses (imbalance) of electric power on train traction.

The concept of «energy security» is considered in relation to railway transport. It is shown that, taking into account the energy consumption currently in force at JSC «Russian Railways» and the volumes of transportation work performed, the most important thing is to ensure energy security of train electric traction. The need to revise the existing regulatory and methodological framework for determining the technical and economic effect of introducing energy-saving measures is substantiated. General principles for calculating the expected effect before introducing a measure and the effect for the reporting period after introducing the measure are presented. A classification of methods for determining the effect of introducing energy-saving measures is given and a group of measures aimed at reducing the consumption and losses of electric power for train traction is identified. To assess the effect of these measures, it is necessary to use simulation modeling or statistical methods of regression analysis based on collecting and processing data for several years. A list of operational factors that have the greatest impact on the level of electric power losses for train traction is compiled.

Based on the results of simulation modeling and processing of statistical samples using regression analysis, two regression dependencies are proposed that allow us to assess the influence of external factors on the level of electricity losses in train traction.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

*The use of the obtained results will improve the accuracy of determining the effect of introducing energy-saving measures aimed at reducing the level of electric power losses for train traction and, consequently, the accuracy of determining the existing level of energy safety of train electric traction.*

**Keywords:** *energy safety, energy efficiency, electric traction of trains, energy saving measures, losses (imbalance) of electric power.*

Понятие «энергетическая безопасность» и соответствующие направления научных исследований были определены в середине 70-х гг. XX в. [1]. Наблюдаемые в настоящее время тенденции в данной области (конкуренция за объемы поставляемых энергоресурсов и рынки сбыта, резкие скачки цен, применение нерыночных методов формирования цен, установление запретов на транзит и т. д.) подтверждают актуальность исследований по обеспечению энергетической безопасности.

Рассматривать вопрос обеспечения энергобезопасности необходимо на нескольких уровнях – на уровне макрорегионов (Европа, Юго-Восточная Азия), отдельных стран (Китай, Словакия, Венгрия), регионов (Дальний Восток, Крым), отраслей (химическая, автомобилестроительная) и отдельных компаний. Обеспечение энергобезопасности на любом из перечисленных уровней, с одной стороны, всегда зависит от надежности и разнообразия источников энергоресурсов, а с другой – от умеренности спроса и «предотвращения нерационального использования энергоресурсов (взаимосвязь с политикой энергетической безопасности)» [2]. Следует отметить, что обеспечение энергобезопасности может выполняться по потреблению как энергоресурсов в целом, так и отдельных их видов.

Применительно к железнодорожному транспорту можно рассматривать вопрос обеспечения энергетической безопасности отдельно, применительно к технологическим процессам – электрическая тяга, автономная тяга и нетяговые нужды (по видам используемых энергоресурсов).

Согласно отчетным статистическим данным затраты на энергоресурсы в общих расходах ОАО «РЖД» составляют шестую часть и являются второй по размерам статьей затрат после фонда оплаты труда. В данной статье затрат приведены такие показатели: расходы на электроэнергию на тягу поездов составляют около 50 % от всех затрат на энергоресурсы, на дизельное топливо – 35 %, а на нетяговые нужды – только 15 %. В то же время необходимо учитывать, что на электротяге выполняется около 85 % перевозочной работы.

На основании анализа приведенных данных можно сделать вывод о том, что обеспечение энергетической безопасности электротяги поездов является приоритетной задачей в построении системы энергобезопасности железнодорожного транспорта.

Энергетическая безопасность – это состояние защищенности граждан, общества, государства, экономики от угроз дефицита в обеспечении их потребностей в энергии экономически доступными энергетическими ресурсами приемлемого качества, от угроз нарушения бесперебойности энергоснабжения [3], соответствующей в нормальных условиях обеспечению в полном объеме обоснованных потребностей (спроса) в энергии, а в экстремальных условиях – гарантированному обеспечению минимально необходимого объема потребностей. Аналогичные условия обеспечения энергетической безопасности для нормального и экстремального (поставарийного) режимов работы должны предусматриваться и для электротяги поездов.

Энергетическая безопасность характеризуется тремя главными факторами:

способностью поставщиков обеспечивать достаточное предложение экономически доступных и качественных энергоресурсов;

способностью потребителей рационально (бережно) расходовать энергоресурсы и соответственно ограничивать свой спрос;

достаточно высоким уровнем устойчивости систем энергетики и топливно-энергетического комплекса в целом к возмущающим воздействиям при реализации потенциальных угроз энергетической безопасности (экономических, социально-политических, техногенных, природных, управленческо-правовых), а также устойчивости

сферы энергопотребления к дефицитам и нарушениям энергоснабжения, вызванным этими угрозами [4].

В рамках реализации ежегодной программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности ОАО «РЖД» на сети железных дорог ежегодно внедряются до 200 видов организационно-технических мероприятий, направленных на повышение эффективности использования и снижения потерь энергоресурсов на десятках тысяч объектов. При это около 65 % экономии энергоресурсов приходится на снижение энергопотребления на тягу поездов.

Одним из важных аспектов внедрения энергосберегающих мероприятий является достоверность планирования ожидаемых результатов от их внедрения, что оказывает непосредственное влияние на принятие решения о целесообразности внедрения того или иного мероприятия на основании расчетного срока его окупаемости. Не менее важной является достоверность определения фактически полученного эффекта после внедрения мероприятия [5, 6].

Оценка эффекта от внедрения энергосберегающих мероприятий может выполняться по двум вариантам:

- 1) «Было» – «Стало» (с учетом приведения фактического потребления энергоресурсов в базовом периоде к условиям отчетного периода);
- 2) «Стало» – «Было бы без мероприятия».

При принятии решения о целесообразности внедрения энергосберегающего мероприятия должны быть учтены реализуемость и степень рисков невыполнения или выполнения мероприятий в неполном объеме.

В общем случае эффект от реализации энергосберегающего мероприятия определяется следующим образом:

– для расчета ожидаемого эффекта до внедрения мероприятия

$$\Theta = \sum_i \Pi_i^{\text{пл}} \left( B_i^{\text{баз}} \times \prod_j k_j^{\text{пл}} - A^{\text{пл}} \cdot b_i^{\text{пл}} \right); \quad (1)$$

– для расчета эффекта в отчетном периоде после внедрения мероприятия

$$\Theta = \sum_i \Pi_i^{\text{отч}} \left( B_i^{\text{баз}} \times \prod_j k_j^{\text{отч}} - B_i^{\text{отч}} \right), \quad (2)$$

где  $\Pi_i^{\text{пл}}$ ,  $\Pi_i^{\text{отч}}$  – стоимость (тариф)  $i$ -го энергоресурса соответственно в плановом и отчетном периодах;

$B_i^{\text{баз}}$ ,  $B_i^{\text{отч}}$  – объем потребления  $i$ -го энергоресурса соответственно в базовом и отчетном периодах;

$A^{\text{пл}}$  – объем работы в плановом периоде;

$b_i^{\text{пл}}$  – плановый удельный расход  $i$ -го вида энергоресурсов;

$k_j^{\text{пл}}$ ,  $k_j^{\text{отч}}$  – коэффициенты приведения объема базового потребления энергоресурсов к

условиям соответственно планового и отчетного периодов ( $k_j$  – по температуре окружающего воздуха,  $k_n$  – по количеству дней работы,  $k_{\text{уст}}$  – по установленной мощности оборудования и т. д.).

Классификация способов определения эффекта (значений  $B_i^{\text{баз}}$ ,  $B_i^{\text{отч}}$ ) от внедрения энергосберегающих мероприятий приведена на рисунке 1. В большинстве случаев определение этих величин на нетяговые нужды не вызывает каких-либо затруднений, так как осуществляется по показаниям счетчиков энергоресурсов и легко поддающихся учету внешних факторов, оказывающих влияние на энергопотребление.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Однако ситуация с оценкой влияния каждого энергосберегающего мероприятия на потребление электроэнергии на тягу поездов вызывает серьезные сложности. Это обусловлено тем, что на потребление электроэнергии на тягу поездов оказывает влияние более 30 внешних факторов. Поэтому важно определить составляющую изменения электропотребления и (или) потерь электроэнергии на тягу поездов от внедрения конкретного энергосберегающего мероприятия, особенно в случае внедрения на одном участке нескольких таких мероприятий.



Рисунок 1 – Классификация способов определения эффекта от внедрения энергосберегающих мероприятий

Именно в таких случаях требуется применение специальных методик расчета. Примеры специализированных способов расчета эффекта от энергосберегающих мероприятий, направленных на снижение расхода энергоресурсов на тягу поездов, утвержденных для применения в ОАО «РЖД», приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Действующие специализированные способы расчета эффекта от энергосберегающих мероприятий по экономии энергоресурсов на тягу поездов

Направление получения эффекта	Способы определения эффекта
Снижение расхода ТЭР на тягу поездов за счет изменений в организации движения поездов, скорости движения, массы состава и т. д.	Методика анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов (утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 512 от 26.12.2014)
Снижение расхода и потерь электроэнергии на тягу поездов за счет модернизации системы тягового электроснабжения	Имитационное моделирование режимов взаимодействия системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава в программном комплексе «КОРТЭС» (свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2008615261)
Повышение эффективности использования энергии рекуперации	Методика оценки эффективности использования энергии рекуперации (утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 2784/р от 29.12.2016)

Особо следует выделить группу энергосберегающих мероприятий, прямо или косвенно влияющих на снижение расхода и потерь (небаланса) электроэнергии на тягу поездов.

Потери электроэнергии на тягу поездов (небаланс) представляют собой разницу между объемом поступления (поставки) электроэнергии в контактную сеть через тяговые подстанции и объемом ее расхода всеми потребителями от контактной сети, точками поставки для которых являются эти тяговые подстанции, по показаниям соответствующих приборов учета

потребителей, в том числе для электроподвижного состава за вычетом объема электроэнергии, возвращенной электроподвижным составом в контактную сеть при применении рекуперативного торможения (далее – энергия рекуперации), и (или) определенным расчетным путем по данным о мощности электроустановок потребителей и продолжительности использования этой мощности. На полигоне постоянного тока туда же относят потери в выпрямительных агрегатах тяговых подстанций [7]. При этом выделяют техническую и коммерческую составляющие потерь электроэнергии на тягу поездов. Техническая составляющая обусловлена погрешностью средств измерений и потерями электроэнергии при ее передаче, а коммерческая составляющая вызвана несовершенством средств измерений электроэнергии, их отсутствием, неисправностью или несанкционированным отбором электроэнергии [8].

В зависимости от того, к какому эффекту приводит то или иное энергосберегающее мероприятие по снижению потерь электроэнергии на тягу поездов (на что оказывает влияние), для расчета ожидаемого или фактически получаемого эффекта могут быть применены имитационное моделирование для технической составляющей потерь электроэнергии на тягу поездов и статистические методы регрессионного анализа для общего уровня потерь (небаланса) электроэнергии на тягу поездов. Оценка ожидаемого эффекта от внедрения энергосберегающих мероприятий осуществляется по аналогии с технологией прогнозирования уровня потерь электроэнергии на тягу поездов [9].

Имитационное моделирование позволяет оценить эффективность энергосберегающих мероприятий, оказывающих влияние на следующие показатели перевозочной работы: средняя масса поезда в грузовом и пассажирском движении; средняя техническая скорость в грузовом и пассажирском движении; средний коэффициент участковой скорости в грузовом движении; удельный возврат электроэнергии в контактную сеть при применении рекуперативного торможения; доля перевозочной работы в грузовом виде движения; усредненный индикатор энергоэффективности электровозов.

Для ряда факторов, влияние которых не может быть определено с помощью имитационного моделирования, но для которых существует обширная база статистической информации, на основании регрессионного анализа может быть выполнена оценка эффективности ряда энергосберегающих мероприятий, оказывающих влияние на следующие показатели перевозочной работы: работа в границах участков работы локомотивных бригад расчетного полигона; средняя нагрузка на ось в грузовом движении; порожний пробег вагонов; простой локомотивов в ожидании работы без локомотивной бригады; пробег локомотивов при следовании резервом; время нагона опоздания пассажирских поездов; средняя температура атмосферного воздуха.

Важно отметить, что использование имитационных моделей, как и регрессионного анализа, для оценки влияния внедрения энергосберегающих мероприятий на энергоэффективность электротяги представляет собой сложный процесс сбора и обработки исходных данных, во многих случаях требуется выполнение итерационных расчетов. Чаще всего в этом случае требуется применение специализированных пакетов программ или программных комплексов [10, 11].

Для снижения трудозатрат при составлении отчетов о результатах внедрения энергосберегающих мероприятий (расчете полученного эффекта), направленных на снижение потерь электроэнергии на тягу поездов, целесообразно использовать регрессионные зависимости.

Значение потерь (небаланса) электроэнергии на тягу поездов может быть выражено в нескольких размерностях:

- 1) абсолютная величина, кВт·ч;
- 2) относительная величина, %;
- 3) удельный уровень потерь электроэнергии – отношение абсолютной величины потерь (небаланса) электрической энергии на тягу к перевозочной работе кВт·ч / 10 000 ткм бр.

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Проведенный анализ корреляции влияния различных факторов на уровень потерь показал, что в большинстве случаев максимальный коэффициент корреляции выявлен для удельного уровня потерь электроэнергии. Именно его целесообразно использовать для построения регрессионных зависимостей небаланса от влияющих факторов.

Для оценки влияния изменения эксплуатационных факторов на величину удельных потерь (небаланса) предложены две регрессионные зависимости:

– по результатам имитационного моделирования:

$$\Delta w^{\text{тех}} = \beta_0 + \beta_{m_{\text{гр}}} \cdot m_{\text{гр}} + \beta_{m_{\text{пс}}} \cdot m_{\text{пс}} + \beta_{V_{\text{гр}}} \cdot V_{\text{тех гр}} + \beta_{V_{\text{пс}}} \cdot V_{\text{тех пс}} + \beta_{k_{\text{уч гр}}} \cdot k_{\text{уч гр}} + \beta_{\omega_{\text{рек}}} \cdot \omega_{\text{рек}} + \beta_{I_{\text{ээ}}} \cdot I_{\text{ээ}} + \beta_{\alpha A_{\text{гр}}} \cdot \alpha A_{\text{гр}}, \quad (3)$$

где  $\beta_k$  – коэффициент влияния соответствующего  $k$ -го фактора;

$m_{\text{гр}}$  – масса грузового поезда, т;

$m_{\text{пс}}$  – масса пассажирского поезда, т;

$V_{\text{тех гр}}$  – техническая скорость в грузовом движении, км/ч;

$V_{\text{тех пс}}$  – техническая скорость в пассажирском движении, км/ч;

$k_{\text{уч гр}}$  – коэффициент участковой скорости в грузовом движении, %;

$\omega_{\text{рек}}$  – удельная рекуперация, кВт · ч/10 000 ткм брутто;

$I_{\text{ээ}}$  – усредненный индикатор энергоэффективности электровозов, кг у. т./ 10 000 ткм брутто;

$\alpha A_{\text{гр}}$  – доля перевозочной работы в грузовом движении, %;

– по результатам обработки статистической информации:

$$\Delta w = \beta_0 + \beta_A \cdot A + \beta_q \cdot q_{\text{гр}} + \beta_{T_{\text{ож}}} \cdot T_{\text{ож}} + \beta_{L_{\text{рез}}} \cdot L_{\text{рез}} + \beta_{T_{\text{наг}}} \cdot T_{\text{наг}} + \beta_t \cdot t, \quad (4)$$

где  $\beta_k$  – коэффициент влияния соответствующего  $k$ -го фактора;

$A$  – работа в границах участков работы локомотивных бригад расчетного полигона, ткм брутто;

$q_{\text{гр}}$  – нагрузка на ось грузового вагона, т;

$T_{\text{ож}}$  – время простоя локомотивов в ожидании работы, ч;

$L_{\text{рез}}$  – пробег локомотивов резервом, км;

$T_{\text{наг}}$  – время нагона опоздания пассажирскими поездами, мин;

$t$  – температура атмосферного воздуха, °С.

По результатам обработки собранных данных и имитационного моделирования были получены средние значения коэффициентов влияния факторов, приведенные в таблицах 2, 3.

Таблица 2 – Коэффициенты влияния факторов на значение технологических потерь, определенные по результатам обработки данных имитационного моделирования

№ п/п	Влияющий фактор	Значение коэффициента влияния ( $\beta_k$ )	
		постоянный ток	переменный ток
1	Средняя масса поезда:		
	в грузовом движении	0,001421	0,00237
	в пассажирском движении	-0,000630	-0,00055
2	Средняя техническая скорость:		
	в грузовом движении	0,4931	0,38794
	в пассажирском движении	-0,0340	0,00875
3	Средний коэффициент участковой скорости в грузовом движении	-1,788	-2,0782
4	Удельная рекуперация	0,3496	0,17952
5	Доля работы ЭПС в грузовом виде движения	0,1066	0,08795
6	Усредненный индикатор энергоэффективности электровозов	-2,355	-1,74562

# Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 3 – Значения коэффициентов влияния факторов на значение уровня потерь (небаланса) электроэнергии на тягу поездов, полученные по результатам регрессионного анализа статистических данных

Наименование показателя	Значение коэффициента влияния ( $\beta_k$ )
Перевозочная работа	$5,826 \cdot 10^{-7}$
Средняя нагрузка на ось в грузовом движении	0,7677
Порожний пробег вагонов	-0,1768
Простой ЭПС в ожидании работы без локомотивной бригады	$9,760 \cdot 10^{-5}$
Пробег ЭПС при следовании резервом	0,01037
Время нагона опоздания пассажирских поездов	$8,1 \cdot 10^{-4}$
Средняя температура атмосферного воздуха	-0,00584

Полученные результаты и выводы.

1. Рассмотрено использование понятия «энергетическая безопасность» применительно к железнодорожному транспорту. Показано, что с учетом сложившегося в ОАО «РЖД» энергопотребления и объемов выполняемой работы наиболее важным является обеспечение энергетической безопасности электротяги поездов.

2. Показано, что одной из основ энергобезопасности является способность потребителей рационально (бережно) расходовать энергоресурсы. В ОАО «РЖД» на решение вопросов повышения эффективности использования и снижения потерь энергоресурсов выделяется значительно количество средств и ресурсов на всех уровнях управления и выстроена система контроля энергосберегающей деятельности и управления ею.

3. Выполнен анализ существующей системы оценки ожидаемого и фактического эффекта от внедрения энергосберегающих мероприятий на сети железных дорог. Выявлена необходимость доработки существующей нормативно-методической базы для расчета эффекта от внедрения энергосберегающих мероприятий.

4. Представлены общие принципы расчета ожидаемого эффекта до внедрения мероприятия и эффекта за отчетный период после внедрения мероприятия. Приведена классификация способов определения эффекта от внедрения энергосберегающих мероприятий и выделена группа мероприятий, направленных на снижения расхода и потерь электроэнергии на тягу поездов, для оценки эффекта от которых требуется применение имитационного моделирования или статистических методов регрессионного анализа.

5. По результатам проведенных исследований по определению степени влияния различных факторов на уровень потерь (небаланс) электроэнергии на тягу поездов на основе методов имитационного моделирования в программном комплексе «Кортэс», а также с помощью методов корреляционно-регрессионного анализа определены эксплуатационные факторы, оказывающие на этот уровень наибольшее влияние: величина перевозочной работы в структурном подразделении; доля перевозочной работы в грузовом движении; техническая скорость в грузовом и пассажирском движении; коэффициент участковой скорости в грузовом движении; масса грузового, пассажирского и хозяйственного поезда; нагрузка на ось грузового вагона в грузовом и хозяйственном движении; доля порожнего пробега грузовых вагонов; время простоя локомотивов в рабочем состоянии в ожидании работы; пробег локомотивов резервом; усредненный индикатор энергоэффективности электровоза; температура атмосферного воздуха.

6. Выполнена оценка корреляции перечисленных факторов со значениями абсолютного уровня потерь, относительного уровня потерь и уровня удельных потерь относительно объема перевозочной работы. В большинстве случаев максимальный коэффициент корреляции выявлен для уровня удельных потерь электроэнергии на тягу поездов, вследствие чего в дальнейшем для анализа влияния внешних факторов принят именно этот показатель.

7. Для оценки влияния изменения эксплуатационных факторов на величину удельных потерь предложено две регрессионные зависимости: зависимость уровня технологической составляющей удельных потерь от внешних факторов, получаемая по результатам имитационного моделирования, и зависимость уровня удельных потерь (с учетом коммерческой составляющей) от внешних факторов. На основании применения

статистических методов регрессионного анализа определены коэффициенты влияния эксплуатационных факторов на уровень удельных потерь электроэнергии на тягу поездов.

8. Применение полученных результатов позволит повысить точность определения эффекта от внедрения энергосберегающих мероприятий, направленных на снижение уровня потребления и потерь электроэнергии на тягу поездов и, следовательно, точность определения существующего уровня энергобезопасности электротяги поездов.

## Список литературы

1. Energy Dictionary / World Energy Council, 1992, 652 p.; JOUVE SI; Paris (France); ISBN 2-909832-00-7.

2. Указ Президента РФ от 13.05.2019 № 216 «Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ от 20 мая 2019 г. № 20. – Ст. 2421. – Текст : непосредственный.

3. Воропай, Н. И. Энергетическая безопасность. Термины и определения / Н. И. Воропай. – Москва : Энергия, 2005. – 60 с. – Текст : непосредственный. – EDN: SDTFFJ.

4. Воропай, Н. И. Энергетическая безопасность: состояние проблемы и опыт исследований / Н. И. Воропай, С. М. Сендеров. – Текст : непосредственный // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2014. – № 2 (15). – С. 18–24. – EDN: WFRCMB.

5. Никифоров, М. М. Оценка эффективности мероприятий по энергосбережению на железнодорожном транспорте / М. М. Никифоров, А. Л. Каштанов, С. Ю. Ушаков. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции, посвященной Дню российской науки, Омск, 08 февраля 2019 г. / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2019. – С. 372–381. – EDN: GPFSQT.

6. Комяков, А. А. Разработка методов оценки эффективности мероприятий по организации ресурсосберегающих производственных систем железнодорожного транспорта / А. А. Комяков. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (78). – С. 45–53. – EDN PPSPII.

7. Никифоров, М. М. Совершенствование методики определения потерь электроэнергии на тягу поездов / М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 1 (41). – С. 98–107. – EDN: ENEXCK.

8. ГОСТ 32895–2014. Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 40 с. – Текст : непосредственный.

9. Ushakov S., Nikiforov M., Komyakov A. (2023). Methodology for Forecasting the Electricity Losses for Train Traction. In: S. Shmaliy, Y., Nayyar, A. (eds) 7th International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE 2023). *CCIE 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 1047. Springer, Singapore, pp. 145-154, DOI 10.1007/978-981-99-2730-2\_15, EDN: JQGEEI.

10. Вильгельм, А. С. Разработка имитационной модели работы системы тягового электроснабжения Московского центрального кольца для оценки потенциала повышения энергоэффективности тяги поездов / А. С. Вильгельм, А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2019. – № 4 (63). – С. 58–63. – DOI: 10.20291/1815-9400-2019-4-58-63. – EDN: SKZEAW.

11. Вильгельм, А. С. Применение имитационного моделирования для оценки эффективности вариантов усиления системы тягового электроснабжения при интервальном регулировании движения поездов / А. С. Вильгельм, М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2 (94). – С. 48–56. – DOI: 10.46973/0201-727X\_2024\_2\_48. – EDN: HGHNNS.

## References

1. Energy Dictionary / World Energy Council, 1992, 652 p.; JOUVE SI; Paris (France).

2. Decree of the President of the Russian Federation of 13.05.2019 no. 216 «On approval of the Doctrine of Energy Security of the Russian Federation». Collection of Legislation of the Russian Federation of May 20, 2019, no. 20, art. 2421 (In Russian).

3. Voropai N.I. *Energeticheskaja bezopasnost'. Terminy i opredeleniia* [Energy Security. Terms and Definitions]. Moscow, Energy Publ., 2005, 60 p., EDN: SDTFFJ (In Russian).

4. Voropay N.I., Senderov S.M. Energy security: status of the problem and experience of research. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii – Modern science: researches, ideas, results, technologies*, 2014, no. 2 (15), pp. 18-24, EDN: WFRCMB (In Russian).

5. Nikiforov M.M., Kashtanov A.L., Ushakov S.Y. [Improvement of the efficiency estimation system for energy saving measures on railway transport]. *Innovatsionnyye proyekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte. Materialy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy Dnyu Rossiyskoy nauki, Omsk, 08 fevralya 2019 goda* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport. Proceedings of the scientific conference dedicated to the Day of Russian Science, Omsk, February 08, 2019]. Omsk, 2019, pp. 372-381, EDN: GPFSQT (In Russian).

6. Komyakov A.A. Development of methods for estimating the energy efficiency of organizational and technical solutions on railway transport. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State Transport University*, 2020, no. 2 (78), pp. 45-53, EDN: PPSII (In Russian).

7. Nikiforov M.M. Improvement of methodology for determination of electric power losses on train traction. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 1 (41), pp. 98-107, EDN: ENEXCK (In Russian).

8. GOST 32895-2014. Electrification and electric supply of the railways. Terms and definitions. Moscow, Standardinform Publ., 2014. 40 p. (In Russian).

9. Ushakov S., Nikiforov M., Komyakov A. (2023). Methodology for Forecasting the Electricity Losses for Train Traction. In: S. Shmaliy, Y., Nayyar, A. (eds) 7th International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE 2023). *CCIE 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 1047. Springer, Singapore, pp. 145-154, DOI 10.1007/978-981-99-2730-2\_15, EDN: JQGEEL.

10. Vilgelm A.S., Kashtanov A.L., Nikiforov M.M. Development of simulation model of operation of traction power supply system of the Moscow Central Ring for assessment of potential for improvement of train traction energy efficiency. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2019, no. 4 (63), pp. 58-63, DOI 10.20291/1815-9400-2019-4-58-63, EDN: SKZEAW (In Russian).

11. Vilgelm A.S., Nikiforov M.M. The use of simulation modeling to evaluate efficiency makes it possible to strengthen traction power supply systems with interval regulation of train movement. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State Transport University*, 2024, no. 2 (94), pp. 48-56, DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_2\_48, EDN: HGHSN (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Никифоров Михаил Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, директор научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте, ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Никифоров, М. М. Методология оценки влияния энергосберегающих мероприятий по снижению потерь электроэнергии на энергобезопасность тяги поездов // М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 3 (59). – С. 46 – 54.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

### Nikiforov Mikhail Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph.D. in Engineering, director of Research Institute for Energy Efficiency in Railway Transport, OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nikiforov M.M. Methodology for assessing the impact of energy-saving measures to reduce electricity losses on the energy safety of train traction. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 3 (59), pp. 46-54 (In Russian).

С. П. Вакуленко, Д. Ю. Роменский, Д. В. Изюмников

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

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КЛАСТЕРИЗАЦИИ DBSCAN И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ПЕРЕВОЗОК НА ПРИМЕРЕ МОСКОВСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

**Аннотация.** В статье рассмотрены актуальные вопросы оптимизации логистических процессов в условиях ускоренного роста рынка транспортно-логистических услуг и увеличения объемов грузоперевозок в Московской агломерации. В современных условиях особую значимость приобретает применение методов кластеризации, таких как DBSCAN, для группировки грузополучателей и повышения эффективности маршрутизации доставок. Метод DBSCAN, основанный на плотностном подходе, позволяет выделять кластеры произвольной формы с учетом заранее заданных параметров количества точек доставки и расстояния, исключая шумовые данные, что в свою очередь способствует повышению качества логистических операций.

В настоящей работе также подчеркивается важность учета дополнительных параметров, таких как срочность доставки, стоимость, частота заказов, тип груза и расположение грузополучателей, для повышения точности кластеризации. Предложено деление рассматриваемых параметров на две группы: качественные и количественные. Разработан подход, основанный на доработке алгоритма DBSCAN с использованием взвешенного расстояния и нормализации данных. Представлены процесс интеграции весов факторов в модель и алгоритм выполнения кластеризации, что позволяет учитывать специфику логистики и улучшать процессы планирования и распределения ресурсов. Предложена автоматизация маршрутизации внутри каждого кластера с применением задачи коммивояжера.

Исследование предлагаемых решений демонстрирует экономическую эффективность, основанную на снижении затрат и сроков окупаемости внедрения метода кластеризации и маршрутизации. Разработанная модель оптимизации, включающая в себя математические формулы и расчеты, позволяет оценить преимущества применения методов кластеризации в логистике и повысить конкурентоспособность компаний на рынке транспортно-логистических услуг в Московской агломерации.

**Ключевые слова:** кластеризация, метод DBSCAN, маршрутизация, внедрение информационных технологий, доставка грузов, грузовые перевозки, курьерская доставка, Московская агломерация, рынок транспортно-логистических услуг.

Sergey P. Vakulenko, Dmitry Y. Romensky, Denis V. Izyumnikov

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

## USING THE DBSCAN CLUSTERIZATION METHOD AND ADDITIONAL FACTORS IN TRANSPORTATION PLANNING ON THE EXAMPLE OF THE MOSCOW AGGLOMERATION

**Abstract.** The article addresses current issues related to optimizing logistics processes amid the rapid growth of the transport and logistics services market and the increasing volumes of cargo transportation in the Moscow agglomeration. In today's context, utilizing clustering methods, such as DBSCAN, becomes essential for grouping consignees and enhancing the efficiency of delivery routing. The DBSCAN method, based on a density approach, identifies clusters of arbitrary shapes while considering predefined parameters for the number of delivery points and distance. It effectively excludes noise data, thereby improving the quality of logistics operations.

This work also highlights the importance of considering additional parameters such as delivery urgency, cost, order frequency, cargo type, and consignee location to enhance clustering accuracy. The study proposes dividing these parameters into two categories: qualitative and quantitative. The process integrates factor weights into the model, along with an algorithm for executing clustering, allowing for a tailored approach to logistics that improves planning and resource allocation.

The research suggests automating routing within each cluster by applying the traveling salesman problem. The proposed solutions demonstrate economic efficiency through reduced costs and shorter payback periods. The developed optimization model, incorporating mathematical formulas and calculations, evaluates the advantages of using clustering methods in logistics, thereby enhancing the competitiveness of companies in the transport and logistics services market in the Moscow agglomeration.

**Keywords:** clustering, DBSCAN method, routing, implementation of information technologies, freight delivery, cargo transportation, courier delivery, Moscow agglomeration, transport and logistics services market.

В современных условиях ускоренного роста городов и увеличения объемов товарооборота в системах мелких отправок и почтовых грузов вопросы оптимизации логистических процессов становятся все более актуальными. В условиях высокой конкуренции на рынке логистических услуг компании вынуждены искать новые подходы и решения для улучшения качества обслуживания и сокращения издержек [1]. Введение современных методов кластеризации или иных решений, связанных с повышением эффективности логистических процессов, позволяют более точно и эффективно группировать грузополучателей по различным признакам, что в свою очередь способствует оптимизации маршрутов и снижению затрат на транспортировку. Кроме того, актуальность подчеркивается необходимостью интеграции систем управления взаимоотношениями с клиентами, поставщиками, производителями, получателями, т. е. всеми участниками логистического процесса, что позволяет улучшить взаимодействие между ними и повысить внутреннюю мобильность и эффективность [2].

Кластеризация грузополучателей представляет собой процесс группировки клиентов с учетом различных факторов, таких как географическое расположение, объемы заказов, частота покупок и другие параметры. В условиях высокой плотности городской застройки, ограниченных районов и значительных различий в транспортной доступности различных районов требуется использование более гибких и точных методов кластеризации. В частности, метод DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) предлагает решение этой проблемы, позволяя выделять кластеры произвольной формы и игнорировать шумовые данные в максимально возможной форме [3]. Этот метод основан на плотностном подходе, что позволяет более точно выявлять группы клиентов, находящихся в непосредственной близости друг от друга. Применение DBSCAN в городской логистике позволяет создавать более точные и эффективные кластеры, что способствует оптимизации маршрутов и сокращению времени доставки. Однако внедрение этого метода требует тщательного анализа и настройки параметров, что представляет собой определенные сложности и требует дополнительных исследований [4].

Основные параметры алгоритма DBSCAN [5]:

- $\epsilon$  (eps): радиус для определения соседства точки;
- MinPts: минимальное число точек, необходимое для формирования кластера.

Шаги алгоритма (рисунок 1):

- маркировка всех точек как необработанных;
- выбор произвольной необработанной точки  $p$ ;
- поиск всех точек в радиусе  $\epsilon$  от  $p$ ;
- маркировка произвольной точки как шум, если найдено меньше необходимого минимального числа точек для формирования кластера;
- формирование нового кластера и добавление всех соседних точек, если найдено минимальное число точек, необходимое для формирования кластера или больше этого числа;
- рекурсивное повторение процесса для всех соседних точек, не являющихся шумом.

Использование алгоритмов кластеризации в транспортно-логистической деятельности требует учета дополнительных параметров, присущих перевозочному процессу в городской логистике. Учет этих параметров позволит дополнительно повысить точность кластеризации и сделать расчет

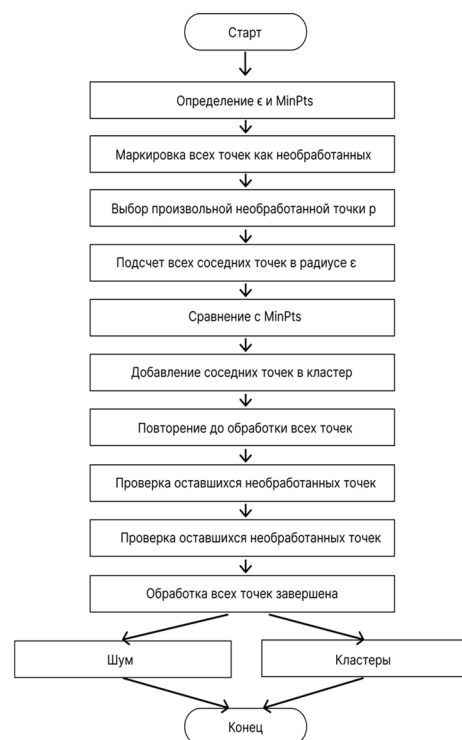


Рисунок 1 – Алгоритм кластеризации DBSCAN

более приближенным к практической деятельности [6]. В первую очередь необходимо разделить параметры на две группы:

1) количественные факторы:

- срочность доставки (время в часах или днях);
- стоимость транспортировки (в денежном эквиваленте);
- частота доставки (раз в неделю/месяц);

2) качественные факторы:

- тип груза (например, хрупкий, скоропортящийся);
- расположение получателей (уровень удаленности: ближний, средний, дальний).

Далее необходимо определить вес рассматриваемых параметров. Это возможно сделать, к примеру, методом экспертных оценок или аналитической иерархической процедурой (АИР): построить матрицу парных сравнений факторов и вычислить веса.

**Шаги метода расчета**

1. Построение матрицы парных сравнений: для каждого фактора эксперты оценивают его относительную важность по отношению к другим факторам по шкале от 1 до 9 [7].

Например, если существуют три фактора (А, В, С), матрица будет иметь вид:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & a_{23} \\ \frac{1}{a_{13}} & \frac{1}{a_{23}} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2. Нормализация матрицы: каждую ячейку матрицы делят на сумму значений в соответствующем столбце.

3. Расчет средних значений строк: средние значения строк нормализованной матрицы дают вес каждого фактора.

**Формула расчета веса:**

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n}, \quad (2)$$

где  $a_{ij}$  – оценка важности  $i$ -го фактора относительно  $j$ -го;  $n$  – число факторов.

Перед тем, как включить факторы в модель, необходимо нормализовать данные, чтобы привести их к единой шкале. Нормализация может быть выполнена с использованием различных методов, таких как нормализация на основе минимальных и максимальных значений, или Z-оценка. Рассмотрим каждый из них:

– нормализация на основе минимальных и максимальных значений [8]:

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (3)$$

где  $x$  – значение исходного параметра;  $x_{\min}$  и  $x_{\max}$  – минимальное и максимальное значения параметра соответственно;

– Z-оценка [9]:

$$x' = \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad (4)$$

где  $\mu$  – среднее значение параметра;  $\sigma$  – стандартное отклонение.

После нормализации данных следующие шаги метода расчета включают в себя интеграцию весов факторов в модель. Это можно сделать путем модификации функции расстояния, используемой в алгоритме DBSCAN, чтобы учесть веса факторов.

### Формула взвешенного расстояния.

В стандартной версии DBSCAN используется евклидово расстояние для определения плотности точек [10]. Можно модифицировать это расстояние для включения весов, используя формулу взвешенного расстояния:

$$d'(p, q) = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i (p_i - q_i)^2}, \quad (5)$$

где  $d'(p, q)$  — взвешенное расстояние между точками  $p$  и  $q$ ;

$w_i$  — вес  $i$ -го фактора;

$p_i$  и  $q_i$  — значения  $i$ -го фактора для точек  $p$  и  $q$  соответственно;

$n$  — общее количество факторов.

Таким образом, шаги интеграции весов в рассматриваемый метод таковы:

#### 1. Нормализация данных:

– нормализация значений всех факторов, чтобы они были на одной шкале;

– расчет веса факторов с использованием метода АНР или другого подходящего метода.

#### 2. Вычисление взвешенных расстояний:

– для каждой пары точек  $(p, q)$  в наборе данных вычисляется взвешенное расстояние с использованием формулы (5).

#### 3. Применение модифицированного DBSCAN:

– использование взвешенного расстояния  $d'(p, q)$  вместо стандартного евклидова расстояния в алгоритме DBSCAN;

– выполнение кластеризации на основе новых расстояний.

В конечном счете полученные расчеты будут иметь вид, представленный в таблице 1.

Таблица 1 – Полученные расчеты между точками с учетом дополнительных факторов

Точка	Срочность (часы)	Стоимость	Частота (раз в неделю)
$P1, P2$	0,5; 0,75	0,5; 0,25	0,25
$P2, P3$	0,5; 0,25	0,5; 0,75	0,25
$P2, P3$	0,75; 0,25	0,25; 0,75	0,5

Интеграция весов дополнительных факторов в модель DBSCAN позволяет учитывать специфические потребности логистики, такие как срочность доставки, стоимость и частота. Этот подход обеспечивает более точную и релевантную кластеризацию, улучшая процессы логистического планирования и распределения ресурсов.

Таким образом, представим обновленный алгоритм кластеризации:

– инициализация: установить значения  $\epsilon$  и MinPts, рассчитать веса факторов;

– обработка данных: нормализовать данные по факторам, вычислить взвешенные расстояния;

– кластеризация: применить модифицированный DBSCAN для формирования кластеров;

– анализ результатов: оценить качество кластеров с помощью дополнительных параметров или метрик.

Далее необходимо определить процесс реализации исследования. Для этого будет использован высокоуровневый язык программирования общего назначения с динамической строгой типизацией и автоматическим управлением памятью – Python.

Процесс будет состоять из следующих этапов:

# Управление процессами перевозок

1. Сбор данных: определение источников данных для анализа (адреса доставок или грузополучателей) и применение сервиса Yandex Maps API (Yandex Maps Application Programming Interface) для получения геокоординат грузополучателей.

2. Подготовка данных: удаление дубликатов, пропущенных значений и любых аномалий в данных и приведение данных к единому масштабу, особенно для дополнительных факторов (например, стоимость, срочность).

3. Вычисление весов факторов: вычисление веса для числовых характеристик.

4. Масштабирование характеристик: масштабирование числовых характеристик с учетом вычисленных весов.

5. Геокодирование адресов: преобразование адресов в Московской агломерации в координаты широты и долготы.

6. Кластеризация: применение алгоритма кластеризации к масштабированным данным с учетом географических координат.

7. Визуализация результатов: визуализация кластеров на карте.

Описанный процесс представлен на рисунке 2.

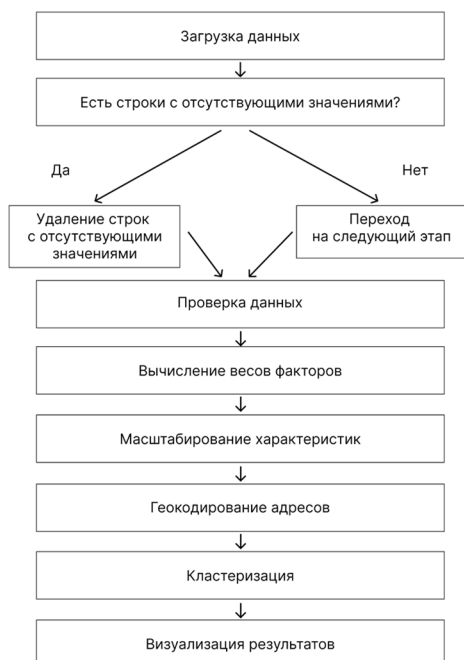


Рисунок 2 – Алгоритм кластеризации DBSCAN

Проведенное исследование показало, что с учетом определенных кластеров кластеризация на минимальном расстоянии не дает точных результатов при увеличении количества точек и сохранении минимального расстояния, результаты также не дают большей эффективности. В связи с этим была предложена доработка алгоритма, а именно включение дополнительного этапа деления на зоны на первоначальной стадии. Это позволит ограничить кластеризацию и одновременно повысить ее эффективность.

Рассматриваемая Московская агломерация была поделена на пять зон в зависимости от географического расположения и дополнительных факторов (удобство доставки, наличие мощностей и т. д.). В качестве примера результат по зоне № 1 с заранее заданными адресами представлен в таблице 2.

Географическое расположение точек кластеров можно представить в виде множества координат на карте (рисунок 3).

Таблица 2 – Полученные результаты кластеризации в зоне № 1

Тип кластера	Количество	Адреса
Кластер 1	4	Московская область, Серпухов, Московское шоссе, 12; Московская область, Кашира, Ленина улица, 14; Московская область, Зарайск, Октябрьская улица, 5
Кластер 2	8	Московская область, Чехов, Гагарина улица, 5; Московская область, Ступино, Ленина улица, 16; Московская область, Домодедово, Советская улица, 17; Московская область, Видное, Березовая улица, 11; Московская область, Подольск, Багратиона улица, 15; Московская область, Ступино, Победы улица, 5; Московская область, Раменское, Карла Маркса улица, 19; Московская область, Лыткарино, Ухтомского улица, 16
Кластер 3	4	Московская область, Подольск, Ленина проспект, 18; Московская область, Домодедово, Корнеева улица, 10; Московская область, Чехов, Московская улица, 34; Московская область, Климовск, Заводская улица, 9
Шум	18	Остальные адреса

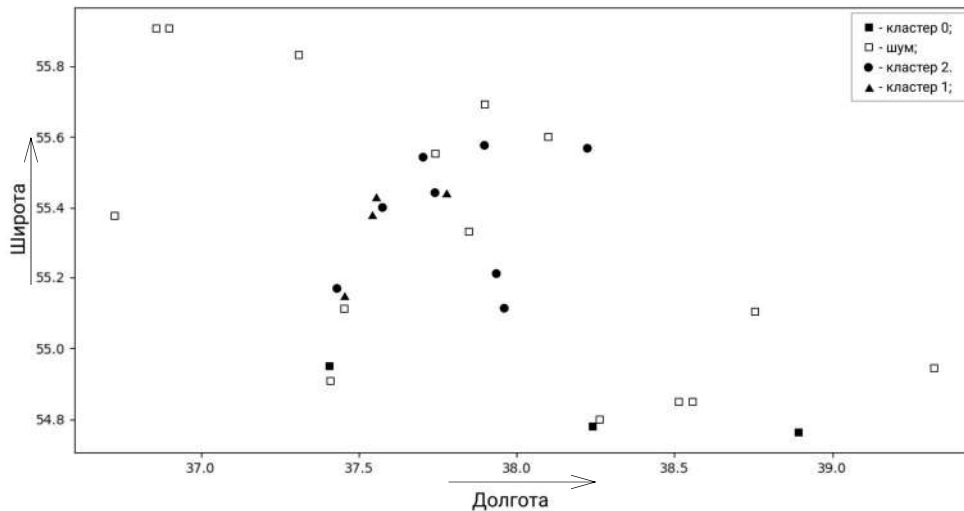


Рисунок 3 – Расположение кластеров и шума в зоне № 1

С учетом полученных результатов и необходимости формирования доставки внутри каждого кластера была предложена автоматизация процесса маршрутизации и доставки с помощью задачи коммивояжера. Задача коммивояжера заключается в нахождении такого порядка посещения точек (перестановки)  $\sigma$ , который минимизирует суммарное расстояние, начиная и заканчивая в одной и той же точке:

$$\min \left( \sum_{k=1}^{n-1} d_{\sigma(k)\sigma(k+1)} + d_{\sigma(n)\sigma(1)} \right), \quad (6)$$

где  $d_{\sigma(k)\sigma(k+1)}$  – расстояние между городами  $k$  ( $\sigma$ ) и  $(k+1)$ ;  $d_{\sigma(n)\sigma(1)}$  – расстояние между последним городом в маршруте  $\sigma(n)$  и начальным городом  $\sigma(1)$ .

При наличии, к примеру, четырех точек в маршруте формула общего расстояния будет иметь вид:

$$L(\sigma) = d_{\sigma(1)\sigma(2)} + d_{\sigma(2)\sigma(3)} + d_{\sigma(3)\sigma(4)} + d_{\sigma(4)\sigma(1)}. \quad (7)$$

Был проведен расчет, показавший минимальный маршрут, на который было бы затрачено наименьшее количество времени (рисунок 4).

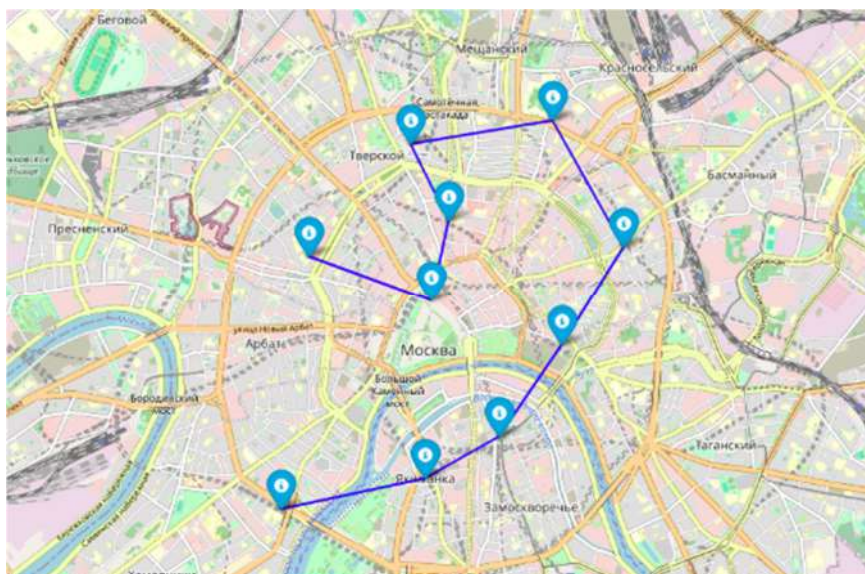


Рисунок 4 – Маршрут в зоне № 5

С точки зрения экономической эффективности были проведены расчеты по окупаемости и экономии от внедрения предлагаемых нововведений.

Определение основных переменных, участвующих в математической модели:

- 1)  $Q$  – общее количество заказов, поступающих в транспортную компанию на обработку;
- 2)  $C_{\text{пост}}$  – постоянные затраты компании;
- 3)  $C_{\text{перем}}$  – переменные затраты на единицу продукции (заказа);
- 4)  $I$  – инвестиции в систему кластеризации и маршрутизации;
- 5)  $L$  – экономия затрат за счет маршрутизации;
- 6)  $K$  – экономия затрат за счет кластеризации;
- 7)  $S$  – экономия затрат за счет улучшения обслуживания клиентов;
- 8)  $P$  – экономия затрат за счет улучшения прогнозирования спроса;
- 9)  $C_{\text{общ}}$  – общие затраты.

При расчете эффективности принимаемых решений будут учитываться и следующие коэффициенты:

- 1)  $\alpha$  – коэффициент эффективности маршрутизации;
- 2)  $\beta$  – коэффициент эффективности кластеризации;
- 3)  $\gamma$  – коэффициент улучшения обслуживания клиентов;
- 4)  $\delta$  – коэффициент улучшения прогнозирования спроса.

Общие затраты будут рассчитаны по формуле:

$$C_{\text{общ}} = C_{\text{пост}} + (C_{\text{перем}} - (\alpha L + \beta K + \gamma S + \delta P)) \cdot Q + I \rightarrow \min. \quad (8)$$

Вводимые ограничения:

$$0 \leq \alpha, \beta, \gamma, \delta \leq 1. \quad (9)$$

Для расчета окупаемости необходимо определить затраты, вносимые до и после внедрения метода кластеризации и маршрутизации:

$$C_{\text{общ. до}} = C_{\text{пост}} + C_{\text{перем}} \cdot Q; \quad (10)$$

$$C_{\text{общ. после}} = C_{\text{пост}} + (C_{\text{перем}} - (\alpha L + \beta K + \gamma S + \delta P)) \cdot Q + I. \quad (11)$$

**Разница в затратах на период до внедрения изменений и после:**

$$C_{\text{экономия}} = C_{\text{перемен. до}} - C_{\text{перемен. после}}. \quad (12)$$

Срок окупаемости

$$T_{\text{окуп}} = \frac{I}{C_{\text{экономия}}}. \quad (13)$$

Согласно проведенным расчетам итоговые показатели таковы:

$$C_{\text{экономия}} = 5,95 \frac{\text{руб.}}{\text{заказ}}.$$

Срок окупаемости

$$T_{\text{окуп}} = 7 \text{ лет.}$$

Таким образом, затраты на внедрение изменений будут окуплены через 7 лет (рисунок 5).

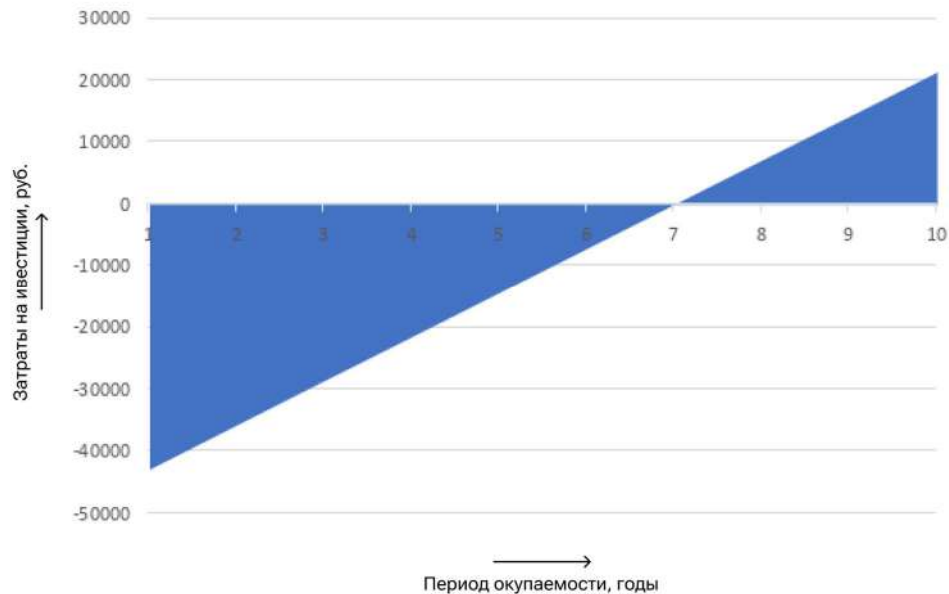


Рисунок 5 – Срок окупаемости внедряемых изменений

Таким образом, математическая модель оптимизации логистических процессов включает в себя формулировку задачи оптимизации, проведение экономического анализа эффективности кластеров и расчет экономических показателей с использованием соответствующих формул и графических элементов. Это позволяет оценить потенциальные выгоды от применения методов кластеризации в логистике и оптимизировать процесс доставки с точки зрения затрат и времени.

В современных условиях динамичного роста городов и увеличения объема перевозок кластеризация и маршрутизация играют ключевую роль в оптимизации логистических процессов городской логистики, когда количество ежедневно обслуживаемых доставок курьерами может достигать десятков и сотен адресов, расположенных на территории крупных агломераций. Применение методов кластеризации, таких как DBSCAN, позволяет более точно группировать грузополучателей на основе географического расположения, объемов заказов и других важных параметров, что существенно повышает эффективность доставки.

Кроме того, интеграция дополнительных факторов, таких как срочность доставки, стоимость и частота заказов, позволяет сделать кластеризацию еще более точной и релевантной. Это улучшает маршрутизацию внутри кластеров с помощью задачи коммивояжера, минимизируя общее время доставки и затраты. Экономический эффект от таких решений проявляется в снижении транспортных издержек и улучшении обслуживания клиентов, что подтверждается проведенными расчетами экономической эффективности. Внедрение предложенных методов обеспечивает значительное улучшение логистических процессов с прогнозируемым сроком окупаемости около 7 лет, что делает их стратегически важным элементом развития компаний в условиях высокой конкуренции.

### Список литературы

1. Изюмников, Д. В. Оценка эффективности внедрения CRM-системы в деятельность организации в сфере транспортно-логистического рынка услуг / Д. В. Изюмников, С. П. Вакуленко, Д. Ю. Роменский. – Текст : непосредственный // Экономика железных дорог. – 2024. – № 1. – С. 21–38. – EDN: НКWRQM.
2. Московский транспортный узел: перспективы развития : монография / С. П. Вакуленко, А. В. Колин [и др.]. – Москва : ВИНТИ РАН, 2017. – Часть II. – 96 с. – Текст : непосредственный. – EDN: PVRCVO.

3. Schubert Erich, Sander Jörg, Ester Martin, Kriegel Hans Peter, Xu Xiaowei. DBSCAN Revisited, Revisited: Why and How You Should (Still) Use DBSCAN. *ACM Trans. Database Syst.*, July 2017, no. 42 (3). DOI:10.1145/3068335.
4. Задачи многокритериальной кластеризации объектов / Я. Э. Детенышева, Н. Г. Мустафин, А. В. Пономарев, Б. В. Соколов – Текст : непосредственный // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : материалы межрегиональной научно-практической конференции / Науч. редактор Б. В. Соколов. – Севастополь : Севастопольский гос. ун-т, 2021. – С. 82–84. – EDN: LHMVQF.
5. Ling R.F. On the theory and construction of k-clusters. *The Computer Journal*, 1972, no. 15 (4). DOI: 10.1093/comjnl/15.4.326.
6. Баймухамедова, Г. С. Количественная и качественная оценка показателей логистики на транспорте / Г. С. Баймухамедова. – Текст : непосредственный // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. – 2014. – № 12-3. – С. 43–45. – EDN: TGEUQJ.
7. Кривулин, Н. К. Построение согласованной матрицы парных сравнений в маркетинговых исследованиях на основе методов тропической математики / Н. К. Кривулин, И. В. Гладких. – Текст : непосредственный // Вестник Санкт-Петербургского университета. Менеджмент. – 2015. – № 1. – С. 3–43. – EDN: TTVNQL.
8. Старовойтов, В. В. Нормализация данных в машинном обучении / В. В. Старовойтов, Ю. И. Голуб. – Текст : непосредственный // Информатика. – 2021. – Т. 18. – № 3. – С. 83–96. – DOI: 10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96. – EDN: JКАНKM.
9. Леонов, А. А. Применение методов интеллектуальной обработки данных для выявления аномалий в реальном масштабе времени / А. А. Леонов, А. В. Дикун, Ю. П. Петропелюк. – Текст : непосредственный // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника-2022 : материалы всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Севастополь : Севастопольский гос. ун-т, 2022. – С. 190–195. – EDN: МКKLUE.
10. Орлов, А. И. О средних величинах / А. И. Орлов. – Текст : непосредственный // Управление большими системами: сборник трудов. – 2013. – № 46. – С. 88–117. – EDN: TDWKAF.

## References

1. Izyumnikov D.V., Vakulenko S.P., Romenskii D.Yu. Evaluation of the effectiveness of implementing a CRM system in the activities of an organization in the transport and logistics services market. *Ekonomika zheleznih dorog – The economy of railways*, 2024, no. 1, pp. 21-38, EDN: HKWRQM (In Russian).
2. Vakulenko S.P., Kolin A.V., Romenskii D.Yu., Sviridenkov V.E., Chekmarev A.E. *Moskovskii transportnyi uzel: perspektivy razvitiia : monografiia* [Moscow Transport hub: development prospects : monograph]. Moscow, VINITI RAN Publ., 2017, Part II, 96 p., EDN: PVRCVO (In Russian).
3. Schubert Erich, Sander Jörg, Ester Martin, Kriegel Hans Peter, Xu Xiaowei. DBSCAN Revisited, Revisited: Why and How You Should (Still) Use DBSCAN. *ACM Trans. Database Syst.*, July 2017, no. 42 (3). DOI:10.1145/3068335.
4. Detenysheva Y.E., Mustafin N.G., Ponomarev A.V., Sokolov B.V. [Multicriteria object clustering problems]. *Perspektivnye napravleniia razvitiia otechestvennykh informatsionnykh tekhnologii : materialy mezhregional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Promising directions for the development of domestic information technologies : materials of the interregional scientific and practical conference]. Sevastopol, 2021, pp. 82-84, EDN: LHMVQF (In Russian).
5. Ling R.F. On the theory and construction of k-clusters. *The Computer Journal*, 1972, no. 15 (4). DOI: 10.1093/comjnl/15.4.326.
6. Baymukhamedova G.S. Quantitative and Qualitative Assessment of Logistics Indicators in Transport. *Gumanitarnye, socialno-ekonomicheskie i obshchestvennye nauki – Humanities, socio-economic and social sciences*, 2014, no. 12-3, pp. 43-45, EDN: TGEUQJ (In Russian).
7. Krivulin N.K., Gladkikh I.V. Computation of the consistent pairwise comparison matrix in marketing research by using methods of tropical mathematics. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Menedzhment – Bulletin of St. Petersburg university. Management*, 2015, no. 1, pp. 3-43, EDN: TTVNQL (In Russian).

8. Starovoitov V.V., Golub Yu.I. Data normalization in machine learning. *Informatika – Informatics*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 83-96, DOI: 10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96, EDN: JKAHKM (In Russian).

9. Leonov A.A., Dikun A.V., Petropelyuk Y.P. [Application of data mining methods for detecting real-time anomalies]. *Intellektual'nye sistemy, upravlenie i mekhatronika-2022 : materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Intelligent Systems, Control and Mechatronics-2022 : proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference of young scientists, postgraduates and students]. Sevastopol, 2022, pp. 190-195, EDN: MKKLUE (In Russian).

10. Orlov A.I. On mean values. *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov – Large-scale systems control*, 2013, no. 46, pp. 88-117, EDN: TDWKAF (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Вакуленко Сергей Петрович

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127055, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Железнодорожные станции и транспортные узлы», заведующий кафедрой «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», директор Института управления и цифровых технологий, РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 274-02-74.

E-mail: info@imiit.ru

### Роменский Дмитрий Юрьевич

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127055, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», начальник центра (научно-образовательный центр «Центр отраслевой экспертно-аналитической деятельности»), РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 274-02-74.

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

### Изыумников Денис Владимирович

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127055, Российская Федерация.

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

Тел.: +7 (926) 853-26-11.

E-mail: izyumnikovdenis@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Вакуленко, С. П. Использование метода кластеризации DBSCAN и дополнительных факторов при планировании перевозок на примере Московской агломерации / С. П. Вакуленко, Д. Ю. Роменский, Д. В. Изюмников. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 3 (59). – С. 55 – 64.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Vakulenko Sergey Petrovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, Building 9, Obraztsova st., Moscow, 127055, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, professor of the department «Railway stations and transport hubs», head of the department «Transport Business Management and Intelligent Systems», Director of «Institute of Management and Digital Technologies», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 274-02-74.

E-mail: info@imiit.ru

### Romensky Dmitry Yurievich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, Building 9, Obraztsova st., Moscow, 127055, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, professor, associate professor of the department of «Transport Business Management and Intelligent Systems», head of the Center (scientific and educational center «Center for Industry Expert and Analytical Activities»), RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 274-02-74.

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

### Izyumnikov Denis Vladimirovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, Building 9, Obraztsova st., Moscow, 127055, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department of Transport Business Management and Intelligent Systems, RUT (MIIT).

Phone: +7 (926) 853-26-11.

E-mail: izyumnikovdenis@yandex.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Vakulenko S.P., Romensky D.Y., Izyumnikov D.V. Using the DBSCAN clusterization method and additional factors in transportation planning on the example of the Moscow agglomeration. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 3 (59), pp. 55-64 (In Russian).

УДК 628.517.2:625.143(045)

**А. Ю. Панин, Ю. А. Панин, Н. Г. Иванова, А. В. Трифонов, А. С. Пономарев**

Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), г. Коломна, Российская Федерация

## ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛУБРИКАЦИИ РЕЛЬСОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НАСЕЛЕНИЕ ШУМА ОТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И ПУТИ

**Аннотация.** В современном мире на здоровье человека все больше сказываются техногенные факторы, в том числе такие, как шум, производимый подвижным составом железных дорог при проходе им селитебных территорий, особенно в ночное время суток. Данный вопрос находится на контроле Правительства Российской Федерации, поэтому на уровне соответствующих ведомств предпринимаются определенные действия с целью снижения остроты этой проблемы.

В статье приведен расчет экономической эффективности одного из шумозащитных мероприятий, осуществляемых на подвижном составе (в источнике шумообразования), а именно применение лубрикации рельсов стационарными устройствами лубрикации по разработанной АО «ВНИКТИ» методике. В качестве эффекта оценивалось снижение годового ущерба населению селитебной территории за счет снижения уровня шумового излучения железнодорожного транспорта, экономического эффекта для условной городской агломерации (микрорайона) с условным количеством жителей, плотности застройки и условным количеством прохода поездов по селитебной территории. Кроме того, введен понижающий коэффициент на количество жителей условной городской агломерации, находящихся под вредным влиянием шума подвижного состава, с учетом того, что порядка 50 % из них составляют жители пенсионного возраста и дети. При этом дети, как правило, посещают детские дошкольные учреждения и школы, расположенные внутри той же территории, но имеющие низкую этажность и вследствие этого пониженное шумовое воздействие.

В результате расчета получен экономический эффект от применения стационарных рельсосмазывателей, работающих по технологии комплементарной (комбинированной) технологии лубрикации рельсов, который обеспечивает окупаемость затрат на вложение этой технологии в течение 1,1 года.

**Ключевые слова:** шум, подвижной состав, эффективность, лубрификация рельсов, рельсосмазыватель.

**Andrey Yu. Panin, Yuri A. Panin, Nataliya G. Ivanova, Alexey V. Trifonov,  
Andrey S. Ponomarev**

Joint Stock Company «Scientific Research and Design-Technological Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»),  
Kolomna, the Russian Federation

## ASSESSMENT OF THE ECONOMIC EFFICIENCY OF RAIL LUBRICATION TO REDUCE THE IMPACT OF NOISE ON THE POPULATION FROM THE INTERACTION OF ROLLING STOCK AND TRACK

**Abstract.** In the modern world human health has been increasingly impacted by anthropogenic factors like railway pass-by noise in residential areas, at night in particular. The Russian Federation Government has been in control of the problem with a number of responsible agencies taking actions to lessen the severity of the issue.

The article provides the results of a cost effectiveness analysis for a railway noise mitigation measure implemented on board the vehicle (at source), namely, the application of rail lubricants via stationary rail lubrication systems following a method developed at the Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock, Joint Stock Company (JSC «VNIKTI»). The effectiveness was estimated in terms of a decrease in annual levels of community annoyance in residential areas following a reduction in railway noise radiation, as well as of the economic effect for a nominal urban community (housing area) with a nominal number of residents, a nominal housing density and a nominal number of train passings through the area. A reduction factor per number of people living in the residential area affected by railway noise was also introduced, account taken of the fact that around 50 % of the population are elderly people and young children. Meanwhile children in general attend kindergartens and schools located within the same residential area but inside more low-rise buildings which minimizes their exposure to noise.

The economic effect of applying stationary rail lubrication systems based on complementary (combined) rail lubrication technology proved to ensure returns of investment with 13 months.

**Keywords:** noise, rolling stock, effectiveness, rail lubrication, rail lubrication system.

Проблема воздействия на человека внешнего шума, излучаемого, в частности, железнодорожным подвижным составом, значительно обостряется в связи с массовыми жилыми застройками городских территорий, которые примыкают к железнодорожным путям. Строительство жилых комплексов в непосредственной близости от железных дорог по причинам вполне понятным, более чем оправдано с экономической точки зрения застройщика.

Однако население этих жилых комплексов в ближайшей перспективе будет нести определенное бремя воздействия на психику человека непрерывного шумоизлучения железнодорожного подвижного состава, что, в свою очередь, ведет к различным типам заболеваний.

Решение данной проблемы обозначено в Указе Президента РФ о национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года от 21 июля 2020 года № 474 в части создания комфортной и безопасной среды для жизни [1].

ОАО «РЖД», являясь национальным железнодорожным перевозчиком и владельцем железнодорожной инфраструктуры, стремится поддерживать высокий уровень экологической безопасности и ответственности своей деятельности. В п. 6.2 экологической стратегии ОАО «РЖД» [2] предусмотрены целевые ориентиры ОАО «РЖД» в области защиты от шума.

Согласно этому документу одним из целевых ориентиров ОАО «РЖД» в области защиты от шума является снижение уровня шумового воздействия на окружающую среду.

Этого можно достичь за счет таких мероприятий, как:

- проведение исследований и составление шумовых карт в населенных пунктах, на основании которых можно будет ранжировать риски шумового воздействия и разрабатывать первоочередные мероприятия по их устранению;
- работы по рельсошлифованию, обточке бандажа колеса, смазыванию рельса;
- укладка упругих рельсовых скреплений;
- укладка бесстыкового пути;
- замена чугунных тормозных колодок композитными;
- оснащение лабораторий центров охраны окружающей среды дополнительным оборудованием для контроля шума;
- установка шумозащитных экранов;
- лесонасаждение;
- разработка и внедрение новых нормативов, направленных на нормирование и снижение уровня шума;
- разработка и внедрение новых технологий, способствующих снижению уровня шума;
- модернизация подвижного состава.

Одними из эффективных и малозатратных способов решения проблемы внешнего шума подвижного состава являются технологии смазки зон контактов колес подвижного состава с рельсами стационарными рельсосмазывателями.

Рельсосмазывание разделяется на технологии смазки кривых участков пути на следующие виды смазывания контактных поверхностей зон контактов колес с рельсами:

традиционная смазка (смазкой с низким коэффициентом трения смазывается внутренняя грань наружного рельса в кривой);

TOR-смазка (смазкой с коэффициентом трения 0,18 – 0,25 смазываются поверхности катания головок внутреннего и наружного рельсов);

комбинированная смазка (смазкой с низким коэффициентом трения смазывается внутренняя грань наружного рельса в кривой, а смазкой с коэффициентом трения 0,18 – 0,25 смазывается поверхность катания головки внутреннего рельса);

комплементарная смазка (смазкой с низким коэффициентом трения смазывается внутренняя грань наружного рельса в кривой, а смазкой с коэффициентом трения 0,18 – 0,25 смазываются поверхности катания головок обоих рельсов).

# Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

По результатам ранее проведенных экспериментов [3] наибольший эффект по снижению шума ожидается от применения комбинированной и комплементарной лубрикации. Однако по условиям безопасности, например, если прекратится лубрикация поверхности катания головки внутреннего рельса и возникнет отворачивающий в противоположную сторону поворота момент сил, влияющий на вписывание тележки подвижного состава в кривой участок пути, можно рекомендовать комбинированную лубрикацию.

На рисунках 1 и 2 представлена технология нанесения модификатора трения на поверхность катания головки рельса перед началом кривой и на боковую грань головки рельса в кривом участке пути (США).

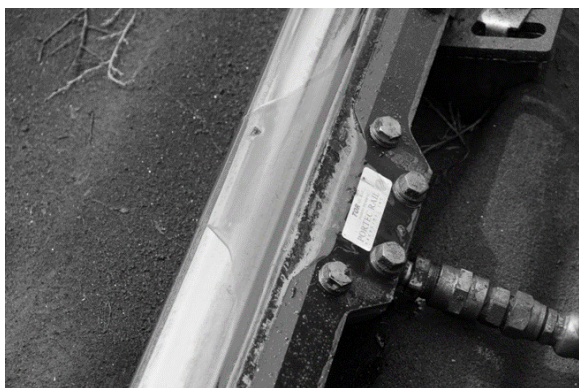


Рисунок 1 – Нанесение модификатора трения на поверхность катания головки рельса



Рисунок 2 – Нанесение лубриканта на боковую грань головки наружного рельса в кривой

Кроме снижения шумового воздействия лубрикация имеет дополнительные эффектообразующие факторы, такие, как снижение износа поверхности катания колес и рельсов и, соответственно, увеличение их межремонтных периодов и срока службы.

В данной работе представлена оценка применения комплементарной лубрикации рельсов (как варианта комбинированной, но более затратного; такая технология тоже применяется за рубежом) стационарными рельсосмазывателями для повышения экономической эффективности снижения воздействия шума на население селитебных территорий городов.

**Оценка экономической эффективности снижения шумового воздействия на население от применения стационарных рельсосмазывателей.** Для реализации комплементарной технологии лубрикации рельсов комплекс стационарных рельсосмазывателей устанавливается в кривых участках пути и состоит из следующего оборудования:

- двух рельсосмазывателей для лубрикации боковой грани левого и правого рельсов (на ближайшей условно правой кривой и следом расположенной условно левой кривой);
- рельсосмазывателя для лубрикации поверхностей катания обоих рельсов.

По результатам полигонных испытаний, проведенных АО «ВНИКТИ» в 2021 г., дальность разноса смазочного материала составляет до 4 – 6 км, что позволяет в значительной степени снизить боковые силы, а также практически исключить вибрации, образование волнообразного износа рельсов и высокочастотный визг. Снижение уровня шумового воздействия оценивается в 10 – 13 дБА [3].

При определении экономического эффекта от снижения уровня внешнего шума подвижного состава за счет применения комплементарной (комбинированной) лубрикации рельсов в качестве годового эффекта принято снижение экономической оценки годового ущерба от транспортного шума, вызываемого железнодорожным транспортом. В данной статье приведен расчет экономического эффекта для условной городской агломерации (микрорайона) с условным количеством жителей, плотности застройки и условным количеством прохода поездов по селитебной территории.

Годовой ущерб от транспортного шума ( $U_t$ ), наносимый населению в год  $t$  представляет собой стоимостную оценку социального ущерба, вызываемого воздействием шума на

# Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

население. Она учитывает прежде всего экономические потери, связанные с ухудшением здоровья людей и понижением их работоспособности вследствие воздействия шума, и может быть ориентировочно определена по формуле:

$$Y_t = Y_{td} + Y_{tn} = \sum_{L=25}^{L_n^{\max}} A(L_A) \cdot N_n(L_A) + \sum_{L=25}^{L_d^{\max}} B(L_A) \cdot N_d(L_A), \quad (1)$$

где  $L_n^{\max}$ ,  $L_d^{\max}$  – максимальные эквивалентные уровни звука за длительный период ночного и дневного времени, соответственно, дБА;  $L = 25$  – уровень звука за длительный период ночного или дневного времени, равный 25 дБА, не вызывающий потери здоровья из-за воздействия шума на человека;  $N_n(L)$  – число людей, проживающих в помещениях, в которых эквивалентный уровень ночных шумов имеет значение между целыми числами  $L$  и  $L + 1$ ,  $L \leq L_n < L + 1$ ;  $N_d(L)$  – число людей, проживающих в помещениях, в которых уровень дневных шумов имеет значение, равное или лежащее между целыми числами  $L$  и  $L + 1$ ,  $L \leq L_d < L + 1$ ;  $A(L)$ ,  $B(L)$  – показатели экономического ущерба, вызванного пребыванием человека в помещении с уровнями ночных и дневных шумов соответственно в пределах от  $L$  до  $L + 1$ .

Для учета влияния внутреннего шума в жилых помещениях применяют значения показателя  $\dot{B}(L)$ , которые учитывают вероятность перекрытия уровня внешних шумов шумами от внутренних источников при различных значениях уровня суммарного внутреннего шума [3].

Значения показателей экономического ущерба  $A(L)$ ,  $B(L)$ ,  $\dot{B}(L)$ , представленные в таблице 1, приняты в соответствии с данными таблицы 29 ОДМ 218.2.013–2011 методических рекомендаций [4], приведенными к уровню 2023 г. с учетом индекса потребительских цен.

Таблица 1 – Показатели экономического ущерба от пребывания человека в помещении с уровнем звука  $L_A$  (руб./чел. в год)

Уровень звука $L_A$ , дБА	Экономический ущерб, вызванный пребыванием человека в помещении с уровнем звука $L_A$ , руб./чел. в год (в ценах 2010 г.)			С учетом индекса потребительских цен на товары и услуги (за 2011 г. – 09.2023 г.)		
	в ночное время $A(L_A)$	в дневное время $B(L_A)$	в дневное время $\dot{B}(L_A)$	в ночное время $A(L_A)$	в дневное время $B(L_A)$	в дневное время $\dot{B}(L_A)$
35	3180	760	51	7438	1778	119
40	6370	1330	133	14899	3111	311
41	7230	1460	204	16910	3415	477
45	11730	2130	640	27435	4982	1497
48	16580	2760	1160	38779	6455	2713
49	18590	3000	1380	43480	7017	3228
50	20750	3260	1630	48532	7625	3812
52	25900	3830	2220	60578	8958	5192
53	28900	4150	2570	67594	9706	6011
54	32230	4500	2970	75383	10525	6947
58	–	6120	5020	–	14314	11741
62	–	8270	7550	–	19343	17659
63	–	8900	8190	–	20816	19156
65	–	10320	9630	–	24137	22524
66	–	11100	10430	–	25962	24395

Кроме этого в расчет введен понижающий коэффициент (в данном случае  $k = 0,7$ ) с учетом того, что порядка 50 % жителей условной городской агломерации составляют пенсионеры и дети. При этом дети, как правило, посещают детские дошкольные учреждения и школы, расположенные внутри той же территории, но имеющие низкую этажность и вследствие этого пониженное шумовое воздействие.

Экономическая оценка годового ущерба от шума, наносимого населению, проживающему на территории условного микрорайона:

# Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- площадь прямоугольного микрорайона – 27 га (600 м × 450 м);
- жилой фонд – 160 тыс. м<sup>2</sup>;
- средняя этажность застройки – 12 этажей;
- население – 11 тыс. чел.;

– доминирующий источник шума в жилых помещениях микрорайона – железнодорожная линия;

– размеры движения составляют: грузовые поезда – четыре поезда в сутки, в том числе в ночное время – три состава; пассажирские поезда – шесть поездов в сутки, из них в ночное время – три поезда;

– значение максимального эквивалентного звука за наиболее шумный час дневного времени составило  $L_{д}^{max} = 80$  дБА; для ночного времени –  $L_{н}^{max} = 67$  дБА. Значения эквивалентного уровня шума составят:  $L_{д}^{экв} = 80 - 5 = 75$  дБА,  $L_{н}^{экв} = 67 - 5 = 62$  дБА.

В качестве базового рассмотрен вариант без проведения шумопоглощающих мероприятий в источнике возникновения шума железнодорожного транспорта (без применения лубрикации рельсов).

В таблицах 2, 3 приведены расчеты базового варианта экономической оценки годового ущерба от действия шума на население условного микрорайона в ночное и дневное время суток, при этом значения эквивалентного уровня шума рассмотрены внутри жилых помещений.

Таблица 2 – Расчет величины годового ущерба базового варианта от воздействия ночного шума на население

Значения $L_{д экв.н}$ в жилых помещениях, дБА	Значения $L_A$ , дБА $L_A \leq L_{АН} < L_A + 1$	$A(L_A)$ , руб./чел. в год	Численность населения $N(L_A)$ , чел.	Экономический ущерб $A(L_A) \cdot N(L_A)$ , тыс. руб.
35,0	35	7438	3000	22314,0
40,3	40	14899	4500	67045,5
45,0	45	27435	1500	41152,5
52,5	52	60578	2000	121156,0
Всего			11000	251668,0

Таблица 3 – Расчет величины годового ущерба базового варианта от воздействия дневного шума на население

Значения $L_{д экв.д}$ в жилых помещениях, дБА	Значения $L_A$ , дБА $L_A \leq L_{АН} < L_A + 1$	$\dot{B}(L_A)$ , руб./чел. в год	Численность населения $N(L_A)$ , чел.	Экономический ущерб $\dot{B}(L_A) \cdot N(L_A)$ , тыс. руб.
48,0	48	2713	3000	8139,0
53,3	53	6011	4500	27049,5
58,0	58	11741	1500	17611,5
65,5	65	22524	2000	45048,0
Всего			11000	97848,0

Суммарная экономическая оценка годового ущерба от действия внешних шумов на население в базовом варианте составит:  $Y_t = Y_{тд} + Y_{тн} = 251\,668 + 97\,848 = 349\,516$  тыс. руб. или с учетом понижающего коэффициента  $Y_{т баз} = 0,7 \cdot 349\,516 = 244\,663,23$  тыс. руб. в год.

В таблицах 4 и 5 приведен расчет экономической оценки ущерба от действия шума на население с учетом применения стационарных рельсосмазывателей.

Таблица 4 – Расчет величины годового ущерба от воздействия ночного шума на население с учетом применения стационарных рельсосмазывателей

Значения $L_{д экв.н}$ в жилых помещениях, дБА	Значения $L_A$ , дБА $L_A \leq L_{АН} < L_A + 1$	$A(L_A)$ , руб./чел. в год	Численность населения $N(L_A)$ , чел.	Экономический ущерб $A(L_A) \cdot N(L_A)$ , тыс. руб.
32,5	32	4491	3000	13473,0
38,0	38	11437	4500	51466,5
43,5	43	21635	1500	32452,5
47,0	47	34592	2000	69184,0
Всего			11000	166576,0

# Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Таблица 5 – Расчет величины годового ущерба от воздействия дневного шума на население с учетом применения стационарных рельсосмазывателей

Значения $L_A$ экв.д в жилых помещениях, дБА	Значения $L_A$ , дБА $L_A \leq L_{An} < L_A + 1$	$\dot{B}(L_A)$ , руб./чел. в год	Численность населения $N(L_A)$ , чел.	Экономический ущерб $\dot{B}(L_A) \cdot N(L_A)$ , тыс. руб.
45,3	45	1497	3000	4491,0
48,0	48	2713	4500	12208,5
50,2	50	3812	1500	5718,0
56,5	56	9098	2000	18196,0
Всего			11000	40613,5

Суммарная экономическая оценка годового ущерба от действия внешних шумов на население с учетом применения стационарных рельсосмазывателей составит:  $Y_t = Y_{tд} + Y_{тн} = 166\,576 + 40\,613,5 = 207\,189,5$  тыс. руб. или с учетом понижающего коэффициента  $Y_{t\text{ рельс}} = 0,7 \cdot 207\,189,5 = 145032,65$  тыс. руб. в год.

Таким образом, снижение экономического ущерба от действия внешних шумов на население с учетом применения стационарного рельсосмазывателя составит:  $\Delta Y_{t\text{ рельс}} = Y_{t\text{ баз}} - Y_{t\text{ рельс}} = 244\,661,2 - 145032,65 = 99\,628,55$  тыс. руб. в год.

Исходные данные для расчета эффективности применения устройств стационарных рельсосмазывателей в кривом участке пути приведены в таблице 6.

Данные для расчета приведены в ценах 2023 г. и имеют приблизительные к оригинальным значения в целях устранения скрытой рекламы производителя.

Таблица 6 – Исходные данные для расчета затрат жизненного цикла стационарного рельсосмазывателя

№ п/п	Наименование показателей	Единица измерения	Значения показателей
1	Стоимость рельсосмазывателя для лубрикации боковой грани рельса	тыс. руб. без НДС	583,33
2	Количество рельсосмазывателей для лубрикации боковой грани рельса	ед.	2,00
3	Стоимость рельсосмазывателя для лубрикации поверхности катания	тыс. руб. без НДС	1500,00
4	Количество рельсосмазывателей для лубрикации поверхности катания	ед.	1,00
5	Стоимость смазки: – лубриканта; – модификатора трения	тыс. руб./16 кг (без НДС)	25,00 35,83
6	Расход смазок: – лубриканта; – модификатора трения	г/1000 осей	200,00 300,00
7	Периодичность обслуживания и ремонта	лет	2,50
8	Стоимость обслуживания и ремонта	% от первоначальной стоимости объекта	15,00
9	Срок службы оборудования	лет	10,00

Величина инвестиций в приобретение и установку оборудования рельсосмазывателя стационарного в кривом участке пути рассчитывается по выражению:

$$K(IC) = C_{б.г} \cdot n_{б.г} + C_{п.к} \cdot n_{п.к}, \quad (2)$$

где  $C_{б.г}$ ,  $C_{п.к}$  – стоимость рельсосмазывателя для лубрикации боковой грани рельса и поверхности катания соответственно (см. таблицу 1);  $n_{б.г}$ ,  $n_{п.к}$  – количество рельсосмазывателей для лубрикации боковой грани рельса и поверхности катания соответственно (см. таблицу 1).

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Величина инвестиций в приобретение и установку оборудования рельсосмазывателя стационарного в кривом участке пути составит:  $K(IC) = 583,33 \cdot 2 + 1500 \cdot 1 = 2666,66$  тыс. руб.

Стоимость условных затрат на проведение НИОКР, в том числе полигонных испытаний, составляет 9750 тыс. руб. (без НДС).

Расчет затрат на смазочные материалы (на 1000 осей) выполнен по формуле:

$$I'_{см} = C_{л} / 16 \cdot q_{л} + C_{м} / 16 \cdot q_{м}, \quad (3)$$

где  $C_{л}$ ,  $C_{м}$  – стоимость 16 кг смазки лубриканта и модификатора трения соответственно (см. таблицу 1), тыс. руб.;  $q_{л}$ ,  $q_{м}$  – расход лубриканта и модификатора трения соответственно (см. таблицу 1), кг.

Затраты на смазочные материалы на 1000 осей составят:  $I'_{см} = 25/16 \cdot 0,2 + 35,83/16 \cdot 0,3 = 0,984$  тыс. руб./ 1000 осей.

Количество осей подвижного состава составит 1532 ед. в сутки исходя из размеров условного движения в сутки четырех грузовых поездов (состав из 71 вагона + двухсекционный локомотив) и шести пассажирских составов (односекционный шестиосный локомотив + 13 вагонов).

Исходя из этого годовые расходы на смазочные материалы составят:  $I_{см} = 0,984 \times \times 1532/1000 \cdot 365 = 550,23$  тыс. руб. в год.

Затраты на техническое обслуживание и ремонт оборудования рельсосмазывателя рассчитаны исходя из периодичности и стоимости регламентных работ.

Техническое обслуживание и ремонт оборудования рельсосмазывателя осуществляются с периодичностью в 2,5 года, стоимость его составляет порядка 15 % от стоимости оборудования, т. е. 400 тыс. руб.

Расчет стоимости жизненного цикла мероприятия по применению технологии стационарного рельсосмазывания в кривых участках пути приведен в таблице 7.

Таблица 7 – Расчет стоимости жизненного цикла мероприятия по применению технологии стационарного рельсосмазывания в кривых участках пути

Год	Инвестиции		Годовые текущие затраты		Коэффициент дисконтирования	Стоимость жизненного цикла, тыс. руб.
	НИОКР	закупка и монтаж оборудования	смазочные материалы	техническое обслуживание и ремонт		
0	9750	2666,66			1,00000	12416,66
1			550,23		0,86133	473,93
2			550,23		0,74189	408,21
3			550,23	400	0,63901	607,21
4			550,23		0,55040	302,85
5			550,23	400	0,47407	450,48
6			550,23		0,40833	224,68
7			550,23		0,35171	193,52
8			550,23	400	0,30294	287,86
9			550,23		0,26093	143,57
10			550,23		0,22475	123,66
Итого	9750	2666,66	5502,30	1200		15632,62

Стоимость жизненного цикла стационарного рельсосмазывателя за срок службы 10 лет составит 15,63 млн руб., или 1,563 млн руб. в год (с учетом дисконтирования).

На рисунке 3 представлены результаты расчета чистого дисконтированного дохода от применения технологии стационарного рельсосмазывания в кривых участках пути, при этом

## Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

в качестве годового эффекта выступает снижение ущерба населению условного городского микрорайона от снижения шумового воздействия.

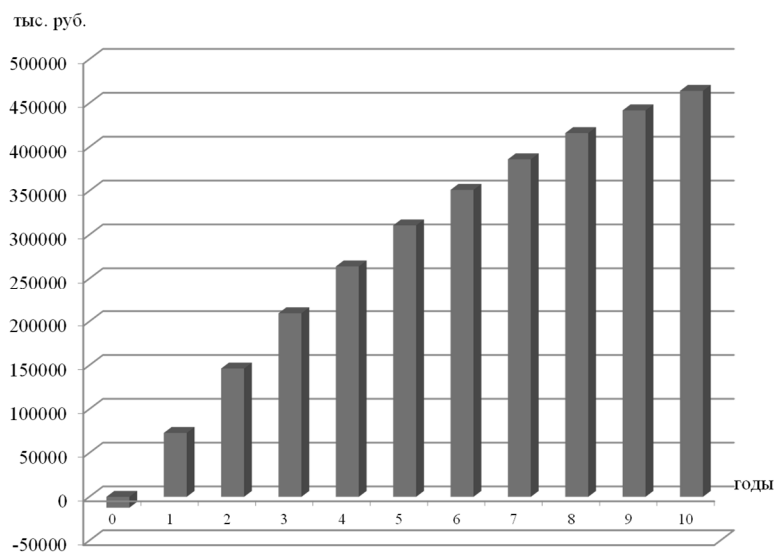


Рисунок 3 – Чистый дисконтированный доход от применения технологии комплементарной (комбинированной) лубрикации рельсов стационарными рельсосмазывателями в кривых участках пути

По результатам расчета экономической эффективности снижения шумового воздействия на население от применения стационарных рельсосмазывателей чистый дисконтированный доход составил 464114,71 тыс. руб. за расчетный период 10 лет, при этом срок окупаемости затрат составит 1,1 года.

Таким образом, применение технологии комплементарной (комбинированной) лубрикации рельсов способствует снижению уровня вредного воздействия на население условного микрорайона, примыкающего к железным дорогам, и несет чистый дисконтированный доход 464,1 млн руб. при сроке окупаемости затрат 1,1 года, с начала эксплуатации за расчетный период 10 лет. Как видно из результатов расчета, технология лубрикации рельсов комплементарная, а значит, и комбинированная, которая еще дешевле, несет весьма ощутимую выгоду при ее реализации.

Условный микрорайон, на который производился расчет, необходимо распространить на всю селитебную территорию, примыкающую к железнодорожным путям. При этом необходимо изменить количество проходящих поездов по этой территории, количество стационарных рельсосмазывателей и затрат на их обслуживание и ввести поправочные коэффициенты, учитывающие количество жителей и плотность застройки.

Внедрение технологии лубрикации рельсов для снижения воздействия шума от взаимодействия подвижного состава и пути может быть выгодным для населения, но затраты на нее будут реализовываться через коммерческие организации. В связи с этим основным механизмом финансирования внедрения описанной технологии лубрикации может являться государственный программно-целевой подход.

В ЕС бюджетное экоинвестирование реализовано с помощью целевых программ, направленных на развитие экологической и климатической политик, содействие перехода к экономике замкнутого цикла в целом и поддержку ресурсоэффективных экологически чистых технологий в частности [5].

Например, финансирование программ осуществляется в виде субсидий, договоров о государственных закупках или прямого кредитования для крупных проектов.

Кроме того, на уровне институциональной поддержки возможно использование механизма государственно-частного партнерства, обеспечивающего сочетание частного и государственного финансирования при реализации инфраструктурных проектов.

Международный опыт развития рынков экоинвестирования свидетельствует о необходимости в первую очередь обеспечения скоординированности действий всех заинтересованных сторон посредством создания единого центра, обеспечивающего взаимодействие и координацию между инициаторами «зеленых» проектов, инвесторами и регуляторами на государственном уровне [5].

## Список литературы

1. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года: Указ Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 г. № 474. – 2020. – 4 с. – Текст : непосредственный.

2. Экологическая стратегия ОАО «Российские железные дороги» на период до 2017 года и на перспективу до 2030 года : распоряжение ОАО «РЖД» от 12.05.2014 № 1143 р. // ОАО «Российские железные дороги» : [сайт]. – Текст : электронный. – URL: <https://fpc.ru/api/media/resources/c/79/121/1082?action=download> (дата обращения: 01.07.2024).

3. Лубрикация рельсов и снижение уровня внешнего шума / В. С. Коссов, Ю. А. Панин, А. В. Трифонов [и др.]. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2022. – № 10. – С. 18–19. – EDN: SUPTZP.

4. ОДМ 218.2.013–2011. Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам. Утверждено Распоряжением Росавтодора № 995-р от 13.12.2012. – Москва : Росавтодор, 2011. – 160 с. – Текст : непосредственный.

5. Майкова, С. Э. Государственные и рыночные механизмы поддержки экоинвестирования: опыт зарубежных стран / С. Э. Майкова. – Текст : непосредственный // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». – 2021. – Т. 8. – № 2. – <https://resources.today/PDF/03ECOR221.pdf>, DOI: 10.15862/03ECOR221 (дата обращения: 01.07.2024).

## References

1. On the Russian Federation national development goals for 2030: Russian Federation Presidential Decree № 474 dated July 21, 2020. Moscow, 2020. 4 p. (In Russian).

2. *Ekologicheskaiia strategiia OAO «Rossiiskie zheleznye dorogi» na period do 2017 goda i na perspektivu do 2030 goda : rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 12.05.2014 № 1143 r.* [Environmental strategy of JSC Russian Railways for the period up to 2017 and for the long term up to 2030: order of JSC Russian Railways dated 12.05.2014 No. 1143 r]. Available at: <https://fpc.ru/api/media/resources/c/79/121/1082?action=download> (accessed 01.07.2024).

3. Kossov V.S., Panin Yu.A., Trifonov A.V., Ponomarev A.S., Panin A.Yu. Rail lubrication and pass-by noise reduction. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway transport*, 2022, no. 10, pp. 18-19, EDN: SUPTZP (In Russian).

4. ODM (Road industrial methodical document) 218.2.013–2011. Recommended practice for protecting neighboring areas from roadway noise. Approved by the Order №995-p dated December, 13, 2012 of the Federal Road Transport Agency. Moscow, Rosavtodor Publ., 2011. 160 p. (In Russian).

5. Maykova S.E. (2021). State and market mechanisms to support eco-investment: the experience of foreign countries. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*, [online], vol. 8, no. 2. Available at: <https://resources.today/PDF/03ECOR221.pdf> (In Russian), DOI: 10.15862/03ECOR221 (accessed 01.07.2024).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Панин Андрей Юрьевич

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, Московская область, 140402, Российская Федерация.  
Инженер I категории.  
Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 12-04.  
E-mail: panin-au@vnikti.com

### Панин Юрий Алектинович

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, Московская область, 140402, Российская Федерация.  
Кандидат технических наук, заведующий отделом.  
Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 11-80.  
E-mail: panin-ua@vnikti.com

### Иванова Наталия Георгиевна

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, Московская область, 140402, Российская Федерация.  
Кандидат экономических наук, заведующая лабораторией.  
Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 12-29.  
E-mail: ivanova-ng@vnikti.com

### Трифонов Алексей Валерьевич

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, Московская область, 140402, Российская Федерация.  
Кандидат технических наук, заместитель заведующего отделом.  
Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 11-80.  
E-mail: trifonov-av@vnikti.com

### Пonomarev Андрей Сергеевич

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, Московская область, 140402, Российская Федерация.  
Заведующий лабораторией.  
Тел.: +7 (496) 618-82-48.  
E-mail: ponomarev-as@vnikti.com

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Оценка экономической эффективности лубрикации рельсов для снижения воздействия на население шума от взаимодействия подвижного состава и пути / А. Ю. Панин, Ю. А. Панин, Н. Г. Иванова [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 3 (59). – С. 65 – 74.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Panin Andrey Yuryevich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, Oktyabrskoy Revolutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.  
Grade I Engineer.  
Phone: +7 (496) 618-82-48, ext. 12-04.  
E-mail: panin-au@vnikti.com

### Panin Yuri Alektinovich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, Oktyabrskoy Revolutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.  
Ph. D. in Engineering, head of department.  
Phone: +7 (496) 618-82-48, ext. 11-80.  
E-mail: panin-ua@vnikti.com

### Ivanova Natalia Georgievna

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, Oktyabrskoy Revolutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.  
Ph. D. in Economics, head of laboratory.  
Phone: +7 (496) 618-82-48, ext. 12-29.  
E-mail: ivanova-ng@vnikti.com

### Trifonov Alexey Valerievich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, Oktyabrskoy Revolutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.  
Ph. D. in Engineering, deputy head of department.  
Phone: +7 (496) 618-82-48, ext. 11-80.  
E-mail: timakov-mv@vnikti.com

### Ponomarev Andrey Sergeevich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, Oktyabrskoy Revolutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.  
Head of Laboratory.  
Phone: +7 (496) 618-82-48.  
E-mail: ponomarev-as@vnikti.com

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Panin A.Yu., Panin Yu.A., Ivanova N.G., Trifonov A.V., Ponomarev A.S. Assessment of the economic efficiency of rail lubrication to reduce the impact of noise on the population from the interaction of rolling stock and track. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 3 (59), pp. 65-74 (In Russian).

## АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА ИСТОЧНИКАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

**Аннотация.** Целью данной работы является исследование возможности повышения энергоэффективности и экологичности котельных агрегатов при сжигании твердого топлива. В качестве объекта исследования были выбраны источники теплоснабжения Забайкальского края как региона с наибольшей величиной загрязнения атмосферного воздуха в России. По результатам анализа теплового баланса и технико-экономических показателей источников теплоснабжения дальнейшее исследование было сосредоточено на самой мощной ТЭЦ Забайкальского края. По исследуемой ТЭЦ рассмотрена возможность повышения энергоэффективности и экологичности путем замены проектного топлива на потенциально возможные. Предметом исследования являются технико-экономические и экологические показатели котлов исследуемого источника теплоснабжения при сжигании различных видов топлива. Была выполнена эколого-экономическая оценка при замене проектного топлива на три потенциально возможных по логистике в Забайкальском крае методом сравнения с показателями котлов при сжигании проектного топлива. По каждому виду топлива были выполнены тепловые испытания котлов на различных нагрузках и получены фактические значения технико-экономических и экологических показателей. Анализировались такие показатели, как изменение КПД котлов, выбросы окислов серы, азота и углерода. На большинстве опытных видов топлива КПД котла возрастал, но при этом в основном увеличиваются выбросы вредных веществ. По результатам выполненного анализа полученных при испытаниях показателей сделан вывод о экономической и экологической нецелесообразности варианта с заменой проектного топлива, что связано с ростом финансовых затрат на топливо при минимальном изменении платы за выбросы вредных веществ по всем опытным видам топлива. Кроме этого повышенная зольность одного из опытных видов топлива однозначно окажет негативное воздействие на ресурс конвективных поверхностей нагрева котла и вспомогательное оборудование котельной установки. Сформулированы возможные направления повышения экологической и экономической эффективности сжигания проектного и опытных видов топлива.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 123102000012-2 «Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива», соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023 г.).

**Ключевые слова:** плазменный розжиг, вредные выбросы, энергоэффективность, котельный агрегат, экологичность.

Andrey G. Batukhtin, Alexander A. Seregin, Sergey G. Batukhtin

Transbaikal State University (ZabSU), Chita, the Russian Federation

## ANALYSIS OF OPTIONS FOR INCREASING ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF HEAT SUPPLY SOURCES

**Abstract.** The purpose of this work is to study the possibility of increasing the energy efficiency and environmental friendliness of boiler units when burning solid fuels. The heat supply sources of the Trans-Baikal Territory were chosen as the object of the study as the region with the greatest amount of air pollution in Russia. Based on the results of the analysis of the heat balance and technical and economic indicators of heat supply sources, further research was focused on the most powerful thermal power plant in the Trans-Baikal Territory. For the CHP plant under study, the possibility of increasing energy efficiency and environmental friendliness by replacing the design fuel with potentially possible ones was considered. The subject of the study is the technical, economic and environmental performance of boilers of the heat supply source under study when burning various types of fuel. An environmental and economic assessment was carried out when replacing the design fuel with three potentially possible ones for logistics in the Trans-Baikal Territory by comparison with the performance of boilers when burning the design fuel. For each type of fuel, thermal tests of boilers were performed at various loads and the actual values of technical, economic and environmental indicators were obtained. Such indicators as changes in boiler efficiency, emissions of sulfur, nitrogen and carbon oxides were analyzed. With most experimental fuels, boiler efficiency increased, but at the same time, emissions of harmful substances mainly increased. Based on the results of the analysis of the indicators obtained during testing, a conclusion was made about the economic and environmental inexpediency of the option of replacing the design fuel, which is associated with an increase in financial costs for fuel with a minimal change in the payment for emissions of harmful substances for all experimental

types of fuel. In addition, the increased ash content of one of the experimental types of fuel will definitely have a negative impact on the life of the convective heating surfaces of the boiler and the auxiliary equipment of the boiler installation. Possible directions for increasing the environmental and economic efficiency of burning design and experimental types of fuel are formulated.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 123102000012-2 «Comprehensive study of the aerodynamic characteristics of plasma systems for thermochemical fuel preparation», agreement No. 075-03-2023-028/1 dated 10/05/2023).

**Keywords:** plasma ignition, harmful emissions, energy efficiency, boiler unit, environmental friendliness.

В российской энергетике по причине холодного климата на большей части территории России немалая доля топливных затрат приходится на выработку тепловой энергии. В мировой энергетике доля твердого топлива составляет около 40 %, но это значительно выше, чем в энергетике России, где по разным оценкам она составляет около 18 %. Это обосновывается экономической целесообразностью, так как во всем мире газ примерно на 25 % дороже угля. Согласно исследованиям Cambridge Energy Research Associates производство электроэнергии на американских угольных электростанциях и вовсе в два раза дешевле по сравнению с газовыми [1]. Для обеспечения работы пылеугольных котлов в энергетике используется мазут для растопки и подсветки пылеугольного факела, что оценивается более чем в 50 млн т/год. Стоимость топочного мазута и угля в основном коррелируют между собой на мировом рынке (рисунок 1).

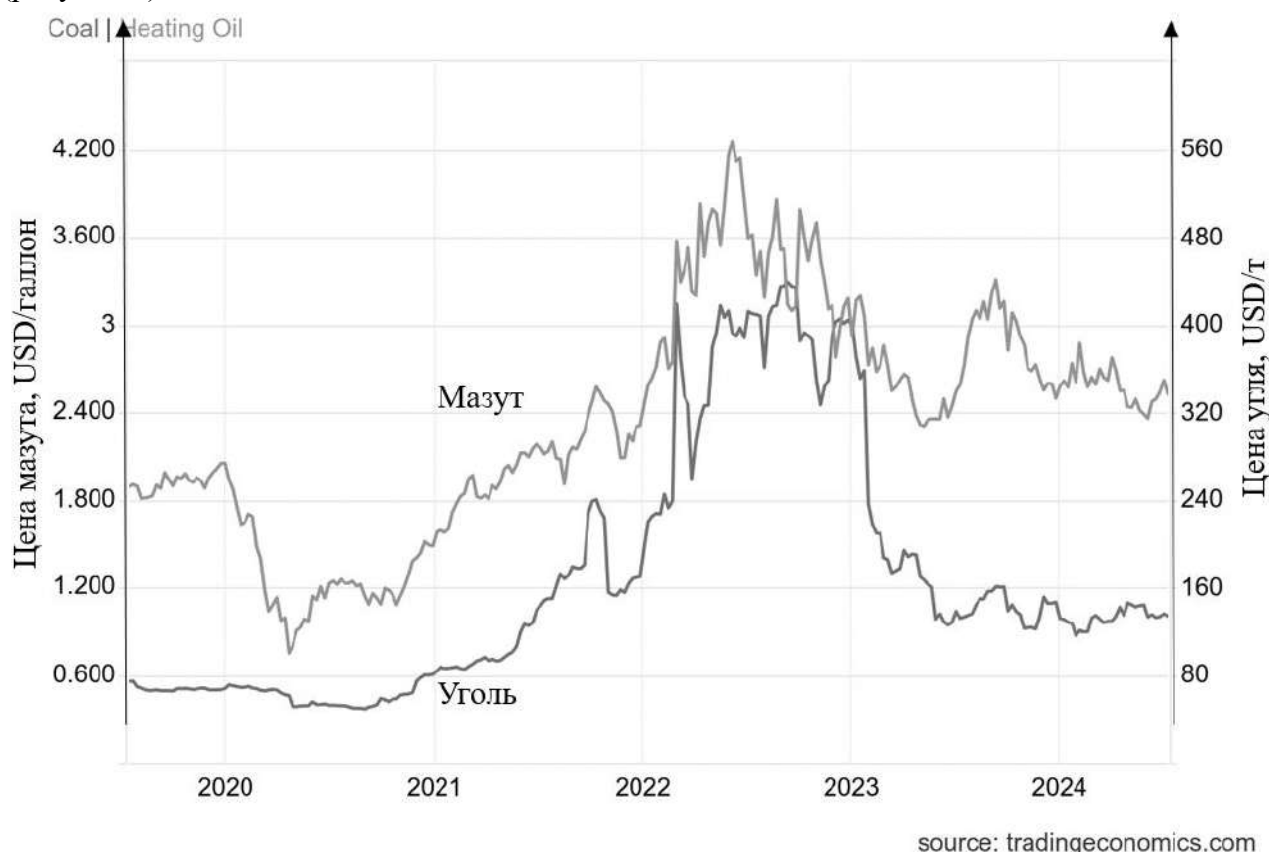


Рисунок 1 – Динамика изменения мировых биржевых цен на топочный мазут и уголь

Что же касается газа, то по оценкам ИНЭИ РАН [1] в электроэнергетике до 2040 г. потребление газа увеличится почти в 2,5 раза, и он обеспечит наибольший прирост производства электроэнергии по сравнению со всеми остальными видами топлива. Однако если рассматривать российскую энергетiku, то здесь, в дальневосточной ее части, в энергетике традиционно преобладают угли. Учитывая постоянную тенденцию к росту объемов потребления и рублевой стоимости топлива в российской энергетике, актуальность эффективности его использования выходит на первый план.

Целью данной работы является исследование потенциальных возможностей повышения энергоэффективности и экологичности котельных агрегатов при сжигании топлива. В качестве объекта исследования выбраны источники теплоснабжения Забайкальского края. Выбор обосновывается высокими удельными расходами топлива на большинстве источников теплоснабжения и негативной экологической ситуацией в крупных населенных пунктах края. Например, в прошлом году г. Чита вошел в список 33 городов, где комплексный индекс загрязнения атмосферы превышает 14 пунктов. Предметом исследования являются показатели энергоэффективности и экологичности источников теплоснабжения в связке с оценкой потенциальных возможностей их улучшения. В настоящее время имеется множество научных исследований, направленных на корректную оценку эффективности сжигания топлива, а также на мероприятия по его экономии [2 – 9]. В данной работе сделаем акцент на специфику источников теплоснабжения Забайкальского края в плане вида и технологий сжигания топлива, а также на экологические показатели.

Исследуемая система теплоснабжения Забайкальского края имеет 1255 источников тепла (4 ТЭЦ и 1251 котельная) установленной тепловой мощностью около 6100 МВт. Водогрейные котельные и ТЭЦ в основном работают на буром угле. Традиционный способ сжигания углей водогрейных котельных – слоевое сжигание. Лишь 1/3 водогрейных котлов имеет механизированную подачу угля, остальные – ручную. Выполненные специалистами ФГБОУ ВО «ЗабГУ» тепловые испытания 50 водогрейных котлов, работающих в Забайкальском крае, выявили превышение ключевой потери тепла в котле – потери с уходящими газами. Выбранная для анализа результатов испытаний представительная группа водогрейных котлов [9] (по виду и способу сжигания топлива) в целом отражает ситуацию на всех котельных края. Полученные значения основных фактических потерь тепла лежат в следующих диапазонах:

потери с уходящими газами составили 21,38 – 27,98 %, что выше верхнего нормативного предела в 12 %;

потери с химическим недожогом составили 0,6 – 2,1 %, что в пределах нормы 0,5 – 3,0 % для слоевого способа сжигания;

потери с механическим недожогом составили 3,42 – 5,08 %, что также в пределах нормы для слоевого способа сжигания – до 18 %.

Основными причинами высоких тепловых потерь с уходящими газами можно назвать частую работу котлов на непроектном и некачественном топливе, высокие присосы из-за разрушенной обмуровки, отсутствие регулирования подачи воздуха и длительная работа котлов на частичной нагрузке. Полученное среднее значение КПД испытанных водогрейных котлов составляет 69,11 %, что ниже целевого значения 75 % для котлов, работающих на буром угле. На рисунке 2 представлены полученные на основе тепловых испытаний фактические зависимости основных параметров работы котлов от их относительной нагрузки.

Как видно из рисунка 2, с понижением нагрузки котлов растет потеря тепла с уходящими газами и влияющие на нее параметры (объем и энтальпия уходящих газов).

Исходя из анализа потерь тепла и влияющих на них факторов для повышения эффективности сжигания угля на водогрейных котлах возможны следующие варианты:

- устранение присосов по тракту котла;
- оснащение дутьевых вентиляторов системами регулирования подачи воздуха;
- предварительный подогрев воздуха;
- улучшение перемешивания компонентов процесса горения топлива и т. п.

При доведении КПД угольных котельных Забайкальского края до целевого значения потенциальная финансовая экономия может составить 325 млн руб./год. Однако учитывая низкий профессионализм и закредитованность большинства компаний, управляющих рассматриваемыми котельными, реализовать это на практике невозможно. Например, только по одной из крупных компаний Забайкальского края обслуживающей 105 котельных и одну ТЭЦ чистый убыток за 2023 г. составил 193,4 млн руб.

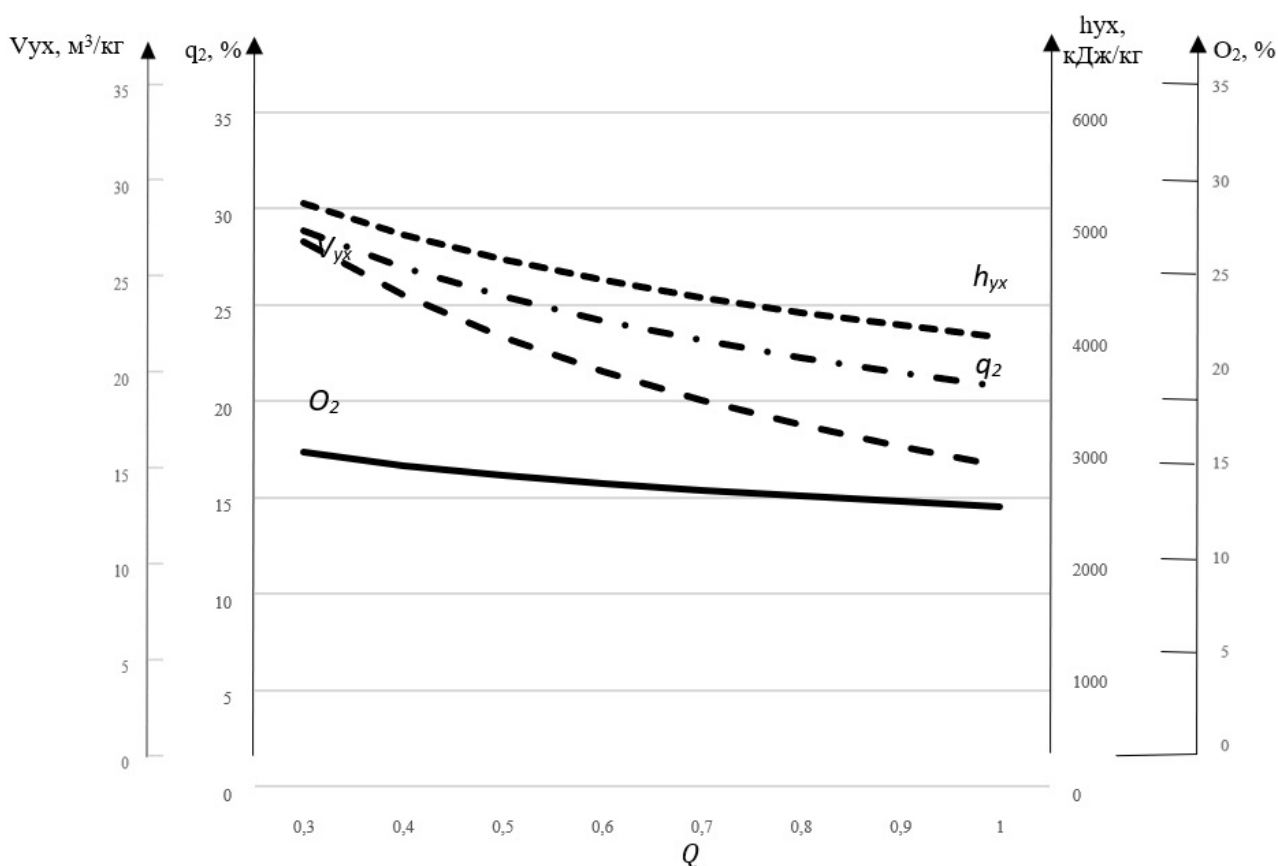


Рисунок 2 – Зависимости основных параметров 50 водогрейных котлов Забайкальского края от их нагрузки:  $Q$  – относительная нагрузка котла;  $V_{ух}$  – удельный объем уходящих газов;  $q_2$  – потери тепла с уходящими газами;  $h_{ух}$  – энтальпия уходящих газов;  $O_2$  – содержание кислорода в уходящих газах

Несмотря на значительный потенциал энергосбережения по котельным доля котельных в тепловом балансе, например, самого большого города Забайкальского края (г. Чита), составляет менее 10 %. Доля вредных выбросов котельных г. Читы составляет лишь 3 – 5 % от суммарных выбросов объектов энергетики города. Исходя из изложенного выше в данной работе сосредоточимся на крупных источниках теплоснабжения в виде ТЭЦ. Расположение ТЭЦ вблизи крупных потребителей тепла также делает более актуальным экологический аспект. Анализ показателей энергоэффективности для наиболее крупной ТЭЦ края свидетельствует об определенном потенциале энергосбережения. Фактический удельный расход топлива по тепловой энергии составляет 148,2 кг у.т./Гкал при целевом значении 141,0 кг у.т./Гкал. По всем ТЭЦ края удельный расход условного топлива на отпуск тепловой энергии составляет 160,0 кг у.т./Гкал, что также превышает целевое значение более чем на 13 %. Рассматриваемый показатель также выше значений на ТЭЦ в других аналогичных системах теплоснабжения России. При доведении показателей двух ТЭЦ г. Читы до целевого значения по тепловой энергии финансовая экономия может составить около 1,4 млрд руб./год. Далее из всех ТЭЦ в качестве объекта исследования выберем самую мощную – Читинскую ТЭЦ-1. На исследуемой ТЭЦ в качестве основного топлива используется бурый уголь, а в качестве растопочного топлива применяется мазут. Энергетические котлы в количестве 13 шт. паропроизводительностью 220 – 240 т/ч (12 котлов БКЗ-220-100 и 1 котел БКЗ-240-100) предназначены для пылевидного сжигания топлива, имеют систему естественной циркуляции. ТЭЦ расположена в г. Чита и оказывает влияние на экологию города из-за своего некорректного расположения, требуемого розой ветров. В городе в зимний период регулярно фиксируется превышение ПДК в атмосферном воздухе по ряду токсичных веществ, что в основном обусловлено метеоусловиями в зимний период и географией расположения города. Концентрация основных вредных веществ в атмосферном воздухе возрастает с осени, когда

начинается отопительный сезон, и снижается весной (рисунок 3). Определенный вклад в рост этих концентраций вносит и исследуемая ТЭЦ [2].

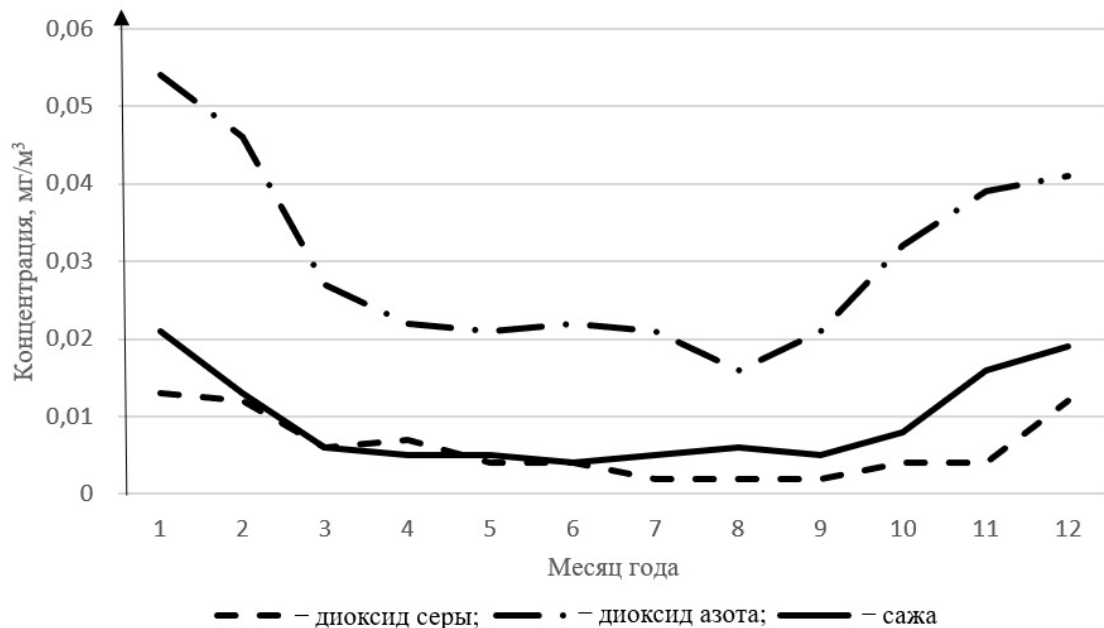


Рисунок 3 – Изменение концентраций вредных веществ в атмосфере г. Чита (по данным Росгидромета)

Выбросы вредных веществ и эффективность горения топлива связаны с характеристиками сжигаемого топлива. Замену проектного топлива можно отнести к мероприятию по возможному снижению финансовых затрат на топливо и повышению экологических показателей котлов. Рассмотрим вариант замены проектного топлива исследуемой ТЭЦ на потенциально возможные с точки зрения логистики их поставки. Для оценки эффективности варианта с заменой проектного топлива на исследуемой ТЭЦ специалистами ПАО «ТГК-14» были проведены тепловые испытания котлов при сжигании трех доступных в Забайкальском крае видов топлива. Цена и теплота сгорания проектного и трех опытных видов топлива представлены на рисунке 4. Расход топлива на котел оценивался исходя из его сожженного объема за время испытаний.

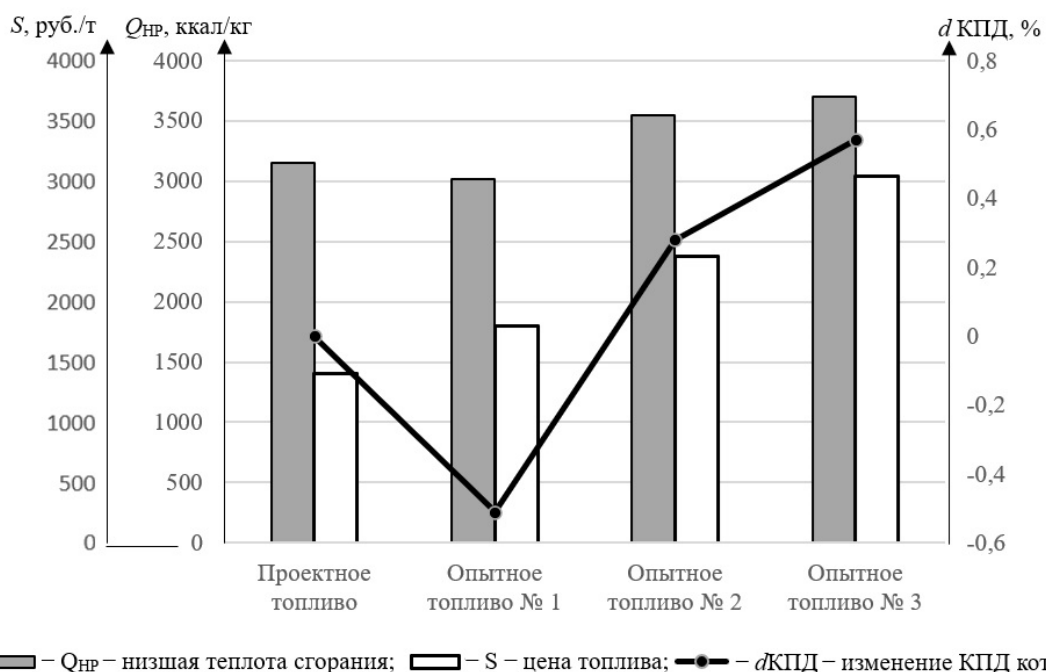


Рисунок 4 – Изменение КПД котла и характеристик опытного топлива

Например, опытный перевод одного из котлов ТЭЦ на сжигание непроектного угля № 2 сопровождался проведением испытаний на трех режимах с паропроизводительностью котла 120, 180 и 210 т/ч. Все измерения проводились с использованием сертифицированных и поверенных приборов, что дает право считать результаты достоверными. В результате проведенных испытаний получены следующие значения показателей работы котлоагрегата:

максимально возможная паропроизводительность достигла лишь 214 т/ч, так как отсутствовал запас по дутью и имелся минимальный запас по тяге;

при максимально возможной паропроизводительности коэффициент избытка воздуха за воздухоподогревателем составил 1,52 при норме 1,36;

присосы воздуха в котле превысили норму по разным участкам на 3,2 – 23 %;

температура уходящих газов составила 169 °С (проектное топливо – 175 °С) за счет меньшего объема дымовых газов при более высокой калорийности;

содержание горючих в шлаке – 6,35 % (норма – 3 %), содержание горючих в уносе – 1,1 % (норма – 3,85 %);

потери тепла с уходящими газами  $q_2 = 10,18$  % (проектное топливо – 10,36 %);

потери тепла с механической неполнотой сгорания  $q_4 = 0,41$  %, (проектное топливо – 0,87 %);

расчетный расход топлива при сжигании опытного угля № 2 составил 41,31 т/ч против проектного топлива 44,93 т/ч, соответственно сокращаются выбросы вредных веществ в окружающую среду;

приведенный КПД котла «брутто» составил 88,11 % (проектное топливо – 87,83 %) за счет меньших потерь с механическим недожогом;

содержание оксидов азота  $NO_x$  после золоуловителя составило 462,84 (мг/нм<sup>3</sup>) при проектном топливе 329,35 мг/нм<sup>3</sup> (минимально возможный уровень выбросов оксидов азота на котле с топкой и технологией сжигания данного типа);

высокое содержание серы угля № 2 по сравнению с проектными топливом ведет к увеличению выбросов диоксида серы  $SO_2$ , содержание  $SO_2$  после золоуловителя составило 1728,31 мг/нм<sup>3</sup> при проектном топливе 122,5 мг/нм<sup>3</sup>.

Аналогичные замеры были проведены и для двух остальных опытных видов топлива на котлах аналогичной марки. Результаты изменения КПД котла и затрат на топливо представлены на рисунке 4. Максимального увеличения КПД котла в 0,57 % удалось добиться при сжигании опытного топлива № 3, однако при этом максимально увеличиваются финансовые затраты на топливо из-за более высокой его цены. При использовании любого из трех опытных видов топлива финансовые затраты на него растут (рисунок 5), что девальвирует эффект от увеличения КПД. Часть выбросов вредных веществ также растет, особенно по диоксидам серы на опытном топливе № 2 из-за его высокой сернистости (таблица 1). Удельные расходы электроэнергии на тягу и дутье достигают максимального значения при сжигании проектного топлива, а на систему пылеприготовления – при сжигании опытного топлива № 1 (таблица 2). В таблице 2 представлены также основные режимные параметры котла при сжигании проектного и опытных видов топлива.

Таблица 1 – Изменение концентрации вредных веществ в дымовых газах при сжигании опытных видов топлива по сравнению с проектным

Топливо	Содержание серы в топливе на рабочую массу, %	Изменение окислов серы, мг/нм <sup>3</sup>	Изменение окислов азота, мг/нм <sup>3</sup>	Изменение оксида углерода, мг/нм <sup>3</sup>
Проектное топливо (Харанорское месторождение)	0,45	–	–	–
Опытное топливо № 1 (Дабан-Горхонское месторождение)	0,8	–1,34	–9	–3,29
Опытное топливо № 2 (Тигнинский разрез)	0,87	1605,81	133,49	–41,92
Опытное топливо № 3 (Кутинское месторождение)	0,34	0	15,15	–54,89

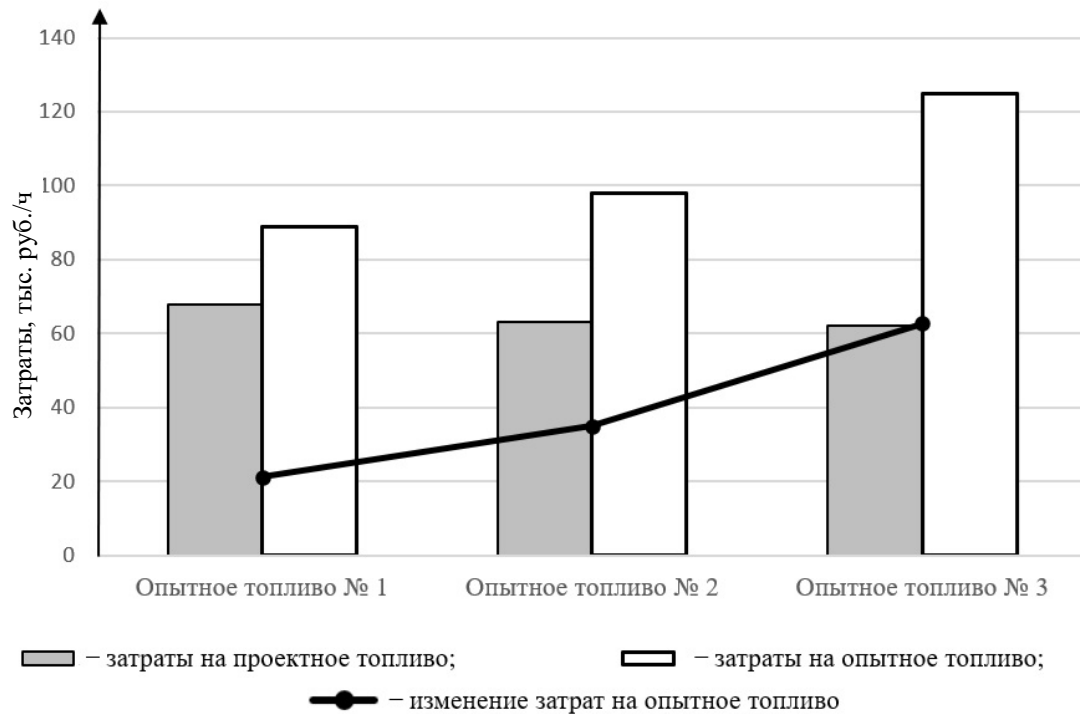


Рисунок 5 – Финансовые затраты на проектное и опытное топливо

Таблица 2 – Основные режимные параметры котельной установки исследуемой ТЭЦ при сжигании различных видов топлива на котле марки БКЗ-220-100Ф

Параметр	Значение параметра				
	проектное (норма)	проектное	опытное № 1	опытное № 2	опытное № 3
Низшая теплота сгорания топлива на рабочую массу, ккал/кг	3150	3371,5	3014	3545	3698
Влажность $W^p$ , %	39,6	36,5	28,3	28,2	28,2
Зольность $A^p$ , %	9,0	8,5	18,5	15,6	14,4
Коэффициент избытка воздуха за воздухоподогревателем	1,36	1,52	1,83	1,52	1,52
Паропроизводительность, т/ч	220	220	220	214	225
Температура перегретого пара, °С	525	525	521	521	522
Температура питательной воды, °С	215	216	229	212	216,6
Присосы воздуха в топку, %	8	31	33	31	31
Удельный расход электроэнергии на пылеприготовление, кВт·ч/тнт (приведенный)	11,8	10,5	13,8	11,6	11,0
Удельный расход электроэнергии на тягу и дутье, кВт·ч/т пара	11,7	10,6	11,2	11,4	10,3

Потенциальный финансовый эффект на ТЭЦ от перехода на сжигание непроеKTного топлива может быть оценен как сумма экономии финансовых затрат на топливо и на плате за выбросы:

$$\Delta S = \Delta S_{fuel} + \Delta S_{em}, \text{ тыс. руб./год}; \quad (1)$$

$$\Delta S_{fuel} = \sum_{i=1}^n (B_{pi} \cdot s_p - B_{efi} \cdot s_{efi}); \quad (2)$$

$$\Delta S_{em} = \sum_{j=1}^m (\Delta M_{pj} - \Delta M_{efj}) \cdot s_{emj}; \quad (3)$$

где  $\Delta S_{fuel}$  – финансовая экономия от снижения затрат на топливо на ТЭЦ, тыс. руб./год;  $\Delta S_{em}$  – финансовая экономия от снижения платы за выбросы на ТЭЦ, тыс. руб./год;  $B_p$  – расход проектного топлива на котел, т/год;  $B_{ef}$  – расход опытного топлива на котел, т/год;  $s_p$  – цена проектного топлива, тыс. руб./т;  $s_{ef}$  – цена опытного топлива, тыс. руб./т;  $\Delta M_p$  – вредный выброс вещества на ТЭЦ при проектном топливе, т/год;  $s_{emj}$  – плата за вредный выброс, тыс. руб./т;  $\Delta M_{ef}$  – вредный выброс вещества на ТЭЦ при опытном топливе, т/год;  $n$  – количество котлов;  $m$  – количество вредных выбросов.

Экономический эффект на ТЭЦ от перехода на сжигание непроеKTного топлива оценивается как сумма экономии финансовых затрат на топливо и на плате за вредные выбросы в окружающую среду. Такая методика расчета обосновывается тем, что при замене проектного топлива меняются его расход и концентрация вредных веществ в дымовых газах из-за разных характеристик топлива. Соответственно изменение этих двух составляющих ведет к пропорциональному изменению финансовых затрат на топливо и платы за выбросы.

На исследуемой ТЭЦ  $\Delta S_{fuel}$  принимает отрицательное значение из-за более высокой цены всех трех опытных видов топлива по сравнению с проектным несмотря на меньший их расход. Отрицательный финансовый результат при применении опытных видов топлива на одном котле составляет от 21 до 63 тыс. руб./ч, или от 1,5 млрд руб./год для всей исследуемой ТЭЦ. Финансовая экономия от снижения платы за выбросы  $\Delta S_{em}$  достигается только при применении опытного топлива № 1, но вследствие невысокого норматива платы за единицу выбросов в России величина  $\Delta S_{em}$  ничтожна. Например, выполненная оценка платы за основные атмосферные выбросы на проектном топливе с учетом фактических режимных параметров эксплуатации котлов исследуемой ТЭЦ составляет по станции всего  $0,96 \pm 0,12$  млн руб./год. Соответственно снижение концентрации по некоторым вредным выбросам на  $1,34 - 54,89$  мг/м<sup>3</sup> не даст ощутимого финансового эффекта, при этом по двум из трех опытных видов топлива выбросы окислов серы и азота, наоборот, значительно возрастают. Расчет выбросов от котлов исследуемой ТЭЦ построен на использовании расчетных зависимостей из РД 34.02.305-98, СО 153-34.02.304-2003 и СО 153-34.02.316-2003, а также на основе ставок платы согласно Постановлению Правительства РФ от 13.09.2016 № 913. Исходя из изложенного можно сделать вывод о экономической и экологической нецелесообразности замены проектного топлива на какое-либо из трех видов опытных. При уменьшении стоимости опытных видов топлива относительно проектного и увеличении нормативов платы за выбросы при ужесточении экологической политики предлагаемое мероприятие может стать экономически целесообразным. При этом проектное топливо имеет не лучшие характеристики среди исследованных.

При выполнении тепловых испытаний также необходимо оценить влияние замены проектного топлива на поверхности нагрева котла и его вспомогательное оборудование. Переход на непроеKTное топливо однозначно скажется на ресурсе и надежности их работы, что может повлиять на экономический и экологический эффект. При выполнении испытаний выявлено следующее:

системы пылеприготовления обеспечивают необходимую сушильную и размольную производительность с номинальной нагрузкой котла при работе трех установленных на котле мельниц. Качество угольной пыли соответствует нормативным рекомендациям. За время испытаний не было зафиксировано обрывов подачи топлива или выхода из строя питателей сырого угля;

при транспортировке всех видов непроектных углей по линиям конвейера наблюдается превышение предельно допустимой концентрации запыленности воздуха рабочей зоны, что не соответствует гигиеническим нормам и нормам пожарной безопасности;

сжигание опытного топлива № 2 и № 3 возможно при снижении тепловой мощности котельных агрегатов по условиям теплового напряжения топочных экранов. Расход перегретого пара при этом не должен превышать 210 т/ч;

повышенная зольность опытного топлива № 1 на рабочую массу изменялась от 18,5 до 22,1 % при проектном топливе в среднем от 10 до 16 %. Вследствие данного фактора можно ожидать увеличения абразивного износа конвективных поверхностей нагрева котла и лопаток дымососа, а также ухудшения работы золоулавливающих установок и ухудшения экологических показателей ТЭЦ;

следует ожидать уменьшения ресурса бил мельниц при работе на опытном топливе № 1;

по причине высокого содержания серы в опытных видах топлива № 1 и № 2 по сравнению с проектным вероятно образование сернистой коррозии на крайних поверхностях нагрева и газоходах. Это приведет к ускоренному износу поверхностей нагрева и газоходов, что, как следствие, увеличит расходы на ремонт котельного оборудования;

значительное влияние на работу котельных и золоулавливающих установок оказывает чистота поверхностей нагрева. Так, при сжигании опытного топлива № 3 отмечен занос топочных экранов и ширм пароперегревателя. Это приведет к росту потерь тепла с уходящими газами.

Кроме варианта замены проектного топлива на исследуемой ТЭЦ возможно повышение эффективности сжигания топлива путем применения плазменной технологии переработки проектного топлива. Плазменная переработка угля позволяет получить из органической массы синтез-газ – экологически чистое топливо, свободное от частиц золы, оксидов серы и азота, из минеральной – ценное вторичное сырье для разных видов производства. Для численного изучения влияния внутреннего теплового источника на термохимические превращения топливной смеси и ее горение использовалось одномерное компьютерное моделирование, которое учитывает механизм кинетики термохимических превращений топлива в двухфазном потоке с плазменным источником. На процесс плазменного воспламенения угля затрачивается 0,05 – 0,4 кВт·ч/кг электроэнергии, т. е. общие затраты на топливо могут быть высокими, что приведет к неэффективности воспламенения угольной пыли без мазута. Продуктивность термохимической подготовки топлива поддерживается плазменным нагревом небольшой доли аэросмеси до температуры выделения летучих угля и неполной газификации остатка кокса, который может воспламеняться и без подсветки мазутом и стабильно гореть. Таким образом, независимо от качества угля из небольшой доли плазменно-активированной угольно-воздушной аэросмеси получают высокорекреационное двухкомпонентное (коксовый остаток и горючий газ) топливо, которое воспламеняется при смешивании с основным потоком аэросмеси и делает устойчивым процесс горения. Все перечисленное выше улучшает экономическую эффективность применения плазменного розжига, финансовый эффект от которого при традиционной схеме ранее уже оценивался авторами [7]. Так же, как и при варианте замены проектного топлива, потенциальный финансовый эффект складывается из эффекта от экономии топлива и эффекта от снижения платы за вредные выбросы. При применении традиционного плазменного розжига ожидаемый финансовый эффект от экономии угля и мазута может составить 145 млн руб./год. Финансовый эффект от снижения платы за вредные выбросы с учетом фактических характеристик котельного оборудования исследуемой ТЭЦ минимален и составляет  $0,27 \pm 0,04$  млн руб./год. Применение плазменной технологии переработки угля по сравнению с традиционным плазменным розжигом однозначно даст большую финансовую экономию. Однако необходимо учитывать затраты на реализацию данной технологии, особенно на старом оборудовании котлов. В данной работе не ставилась цель оценки затрат на внедрение плазменно-топливных систем для исследуемой ТЭЦ.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы. Анализ энергоэффективности источников теплоснабжения Забайкальского края выявил на них определенный потенциал энергосбережения. Для детального исследования выбрана наиболее мощная ТЭЦ Забайкальского края. Она имеет значительное потребление топлива и большую величину выбросов вредных веществ. В качестве варианта повышения технико-экономических и экологических показателей исследуемой ТЭЦ рассмотрен вариант замены проектного топлива. Выполненные тепловые испытания нескольких котлов исследуемой ТЭЦ показали отрицательный экономический эффект при варианте замены проектного топлива как по экономии затрат на топливо, так и по снижению платы за некоторые выбросы вредных веществ. Только от применения опытного топлива на одном из 13 котлов исследуемой ТЭЦ увеличение затрат составляет от 21 до 63 тыс. руб./ч, или потенциально от 1,5 млрд руб./год для всей исследуемой ТЭЦ. Полученные значения можно объяснить более высокой ценой опытных видов топлива при умеренном росте их калорийности. Соответственно повышение эффективности исследуемой ТЭЦ путем замены проектного топлива экономически целесообразно только при снижении стоимости опытного топлива относительно проектного. Возможным вариантом повышения эффективности сжигания топлива и снижения вредных выбросов может стать применение различных схем плазменно-топливных систем на котлах исследуемой ТЭЦ.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 123102000012-2 «Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива», соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023 г.).*

### Список литературы

1. Доля угля в энергобалансе // rg.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://rg.ru/2012/12/21/ugli.html/> (дата обращения: 20.06.2024).
2. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году // mn.gov.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye\\_doklady/gosudarstvennyy\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_o\\_b\\_okhrane\\_okruzhayushchey\\_sredy\\_rossiyskoy\\_federatsii\\_v\\_2021\\_/?ysclid=lj84byun94620981979/](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_o_b_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2021_/?ysclid=lj84byun94620981979/) (дата обращения: 20.06.2024).
3. Эколого-экономическая эффективность плазменных технологий переработки твердых топлив / Е. И. Карпенко, В. Е. Месерле [и др.]. – Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 2000. – 159 с. – Текст: непосредственный.
4. Использование плазменно-топливных систем на пылеугольных ТЭС Евразии / Е. И. Карпенко, Ю. Е. Карпенко, В. Е. Месерле, А. Б. Устименко. – Текст : непосредственный // Теплоэнергетика. – 2009. – № 6. – С. 10–14. – EDN: KUWOHL.
5. Моделирование и испытания плазменно-топливных систем на котле БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2 / В. Е. Месерле, Е. И. Карпенко [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2012. – № 2 (37). – С. 21. – EDN: OZGKSL.
6. Применение систем плазменного воспламенения угольной пыли в котлах Таштагольской производственно-отопительной котельной / А. Н. Тимошевский, И. М. Засыпкин [и др.]. – Текст : непосредственный // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 1 (17). – С. 14–21.
7. Традиционные и перспективные схемы объектов систем централизованного теплоснабжения / А. Г. Батухтин, И. Ф. Суворов [и др.]. – Москва : РАЕН, 2023. – 231 с. – Текст : непосредственный.
8. Басс, М. С. Анализ возможностей применения плазменно-топливных систем для повышения экономичности ТЭЦ на примере источников теплоснабжения города Читы / М. С. Басс, М. В. Кобылкин. – Текст : непосредственный // Энергосбережение и водоподготовка. – 2023. – № 6 (146). – С. 21–26. – EDN: IDFHIJ.

9. Оценка КПД источников тепла как шаг к повышению эффективности экономики региона на примере Забайкальского края / А. А. Середкин, М. В. Кобылкин, М. С. Басс, Ю. О. Риккер. – Текст : непосредственный // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2023. – № 3. – С. 63–68. – EDN: UIYOYV.

## References

1. *Dolia uglia v energobalanse* [Share of coal in the energy balance]. Available at: <https://rg.ru/2012/12/21/ugli.html/> (accessed 20.06.2024).

2. *Gosudarstvennyi doklad o sostoianii i ob okhrane okruzhaiushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2021 godu* [State report on the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2021]. Available at: [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye\\_doklady/gosudarstvenny\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ob\\_okhrane\\_okruzhayushchey\\_sredy\\_rossiyskoy\\_federatsii\\_v\\_2021\\_/?ysclid=1j84byun94620981979/](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvenny_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2021_/?ysclid=1j84byun94620981979/) (accessed 20.06.2024).

3. Karpenko E.I., Messerle V.E., Churashev V.N., Karpenko Yu.E., Zubarev N.M., Nikitin Yu.V., Konechnykh V.V., Zhuravel N.M., Chernova G.V. *Ekologo-ekonomicheskaiia effektivnost' plazmennyykh tekhnologii pererabotki tverdykh topliv* [Ecological and economic efficiency of plasma technologies for processing solid fuels]. Novosibirsk, The science. Siberian Publishing Company RAS Publ., 2000, 159 p. (In Russian).

4. Karpenko E.I., Karpenko Yu.E., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Using plasma-fuel systems at eurasian coal-fired thermal power stations. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 2009, no. 6, pp. 10-14, EDN: KUWOHL (In Russian).

5. Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B., Tyutebaev S.S., Karpenko Yu.E., Yeremina T.V. Modelling and testing of plasma-fuel systems in BKZ-420 boiler of almaty TPP-2. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i upravleniia – Bulletin of the East Siberian State University of Technology and Management*, 2012, no. 2 (37), p. 21, EDN: OZGKSL (In Russian).

6. Timoshevsky A.N., Zasypkin I.M., Vashchenko S.P., Vekesser Yu.G., Komaritsyn V.K. Application of plasma ignition systems of coal dust in boilers of the Tashtagol production and heating boiler house. *Novosti teplosnabzheniia – Heating news*, 2002, no. 1 (17), pp. 14-21 (In Russian).

7. Batukhtin A.G., Suvorov I.F., Seredkin A.A., Karpenko Yu.E., Bass M.S., Batukhtin S.G., Kobylykin M.V. *Traditsionnye i perspektivnye skhemy ob"ektov sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniia* [Traditional and promising schemes of objects of centralized heat supply systems]. Moscow, RANS Publ., 2023, 231 p. (In Russian).

8. Bass M.S., Kobylykin M.V. Analysis of the possibilities of using plasma fuel systems to increase efficiency of thermal power plants using the example of heat supply sources in the city of Chita. *Energobezopasnost' i energosberezhenie – Energy saving and water treatment*, 2023, no. 6 (146), pp. 21-26, EDN: IDFHIJ (In Russian).

9. Seredkin A.A., Kobylykin M.V., Bass M.S., Rikker Yu.O. Efficiency of thermal energy sources as a step towards improving the regional economy on the example of Transbaikal. *Energobezopasnost' i energosberezhenie – Energy security and energy saving*, 2023, no. 3, pp. 63-68, EDN: UIYOYV (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Батухтин Андрей Геннадьевич

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет (ЗабГУ)».

Александрово-Заводская ул., д. 30, г. Чита, 672039, Российская Федерация.

Доктор технических наук, доцент кафедры «Энергетика», ЗабГУ.

Тел.: +7 (914) 455-95-54.

E-mail: batuhkina\_ir@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Batukhtin Andrey Gennadievich

Federal State Educational Institution of Higher Education «Transbaikal State University» (FSBEI HE «TSU», Transbaikal State University).

30, Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, associate professor of the department «Energy», FSBEI HE «TSU», Transbaikal State University.

Phone: +7 (914) 455-95-54.

E-mail: batuhkina\_ir@mail.ru

## Середкин Александр Алексеевич

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет (ЗабГУ)».

Александрово-Заводская ул., д. 30, г. Чита, 672039, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика», ЗабГУ.

Тел.: +7 (914) 430-18-26.

E-mail: aleksandr-ns@mail.ru

## Батухтин Сергей Геннадьевич

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет (ЗабГУ)».

Александрово-Заводская ул., д. 30, г. Чита, 672039, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика», ЗабГУ.

Тел.: +7 (924) 372-08-11.

E-mail: batuhtin1@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Батухтин, А. Г. Анализ вариантов повышения эколого-экономической эффективности на источниках теплоснабжения / А. Г. Батухтин, А. А. Середкин, С. Г. Батухтин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 3 (59). – С. 75 – 86.

## Seredkin Alexander Alekseevich

Federal State Educational Institution of Higher Education «Transbaikal State University» (FSBEI HE «TSU»), Transbaikal State University).

30, Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Energy», FSBEI HE «TSU», Transbaikal State University.

Phone: +7 (914) 430-18-26.

E-mail: aleksandr-ns@mail.ru

## Batukhtin Sergey Gennadievich

Federal State Educational Institution of Higher Education «Transbaikal State University» (FSBEI HE «TSU»), Transbaikal State University).

30, Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Energy», FSBEI HE «TSU», Transbaikal State University.

Phone: +7 (924) 372-08-11.

E-mail: batuhtin1@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Batukhtin A.G., Seredkin A.A., Batukhtin S.G. Analysis of options for increasing environmental and economic efficiency of heat supply sources. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 3 (59), pp. 75-86 (In Russian).

УДК: 621.311

**А. А. Бубенчиков, Г. Ю. Киселёв, Б. Б. Дорогов, И. А. Гаибов**

Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Российская Федерация

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ ТИПА «РОТОР В РАСТРУБЕ» В ЦЕЛЯХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В РЕСПУБЛИКЕ АЛТАЙ

**Аннотация.** В данной статье рассмотрена актуальность проведения мероприятий по недопущению увеличения потерь электрической энергии в условиях тенденции увеличения потребления электрической энергии в Российской Федерации с учетом стратегической направленности ее экономики. Рассмотрена позиция Правительства Российской Федерации в области развития туристической отрасли как в целом, так и в отдельных ее субъектах. Приведены фактические значения потерь электрической энергии по отдельным филиалам публичного акционерного общества «Россети Сибирь». В целях сравнения фактических значений потерь с допустимыми указаны нормативы потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям территориальных сетевых организаций.

В статье в качестве субъекта для изучения рассмотрен такой субъект Российской Федерации, как Республика Алтай. С учетом географического расположения и рельефа местности Республики Алтай рассмотрена актуальность применения неклассических методов электроснабжения, а именно применение альтернативных источников энергии. В соответствии со среднегодовыми показателями скорости ветра в регионе предложен вариант электроснабжения отдельных объектов при помощи ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения. С учетом ветровых особенностей региона предложена ранее разработанная конструкция ветроэнергетической установки типа «ротор в раструбе». Описан процесс получения оптимальной геометрии конструкции путем CFD-оптимизации в программном комплексе Ansys Fluent. Представлена 3D-модель предложенной ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения типа «ротор в раструбе».

Ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения типа «ротор в раструбе» способны преобразовывать низкоскоростной ветер в энергию, а также при скорости ветра в 10 м/с выдавать полезный аэродинамический момент вращения на 25 % выше по сравнению с базовой моделью без дополнительных конструкций, что показывает целесообразность их применения в труднодоступных рекреационных объектах Республики Алтай.

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, потребление электроэнергии, потери электроэнергии, конструкция «ротор в раструбе», установка вихревого типа.

**Anton A. Bubenchikov, Gleb Yu. Kiselyov, Boris B. Dorogov, Ivan A. Gaibov**

Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, the Russian Federation

## APPLICATION OF VERTICAL AXIS WIND POWER TURBINES OF THE «ROTOR IN A BELL» TYPE FOR POWER SUPPLY OF FACILITIES IN THE ALTAI REPUBLIC

**Abstract.** This article examines the relevance of measures to prevent an increase in electrical energy losses in the context of the trend of increasing electrical energy consumption in the Russian Federation, taking into account the strategic focus of its economy. The position of the Russian government in the field of development of the tourism industry both in general and in its individual entities is considered. Actual values of electrical energy losses for individual branches of the public joint Stock company «Rosseti Siberia» are given. And also, for the purpose of comparison, the standards for electrical energy losses during its transmission through the electrical networks of territorial grid organizations are indicated.

The article considers such a subject of the Russian Federation as the Altai Republic as a subject for study. Taking into account the geographical location and terrain of the Altai Republic, the relevance of using non-classical methods of power supply, namely the use of alternative energy sources, is considered. In accordance with the average annual wind speed in the region, an option for power supply of individual objects using wind turbines with a vertical axis of rotation is proposed. Taking into account the wind features of the region, a previously developed design of a wind turbine of the «rotor in a bell» type is proposed. The process of obtaining the optimal geometry of the structure by CFD-optimization in the Ansys Fluent software package is described. A 3D-model of the proposed wind turbine with a vertical axis of rotation of the «rotor in a bell» type is presented.

Wind turbines with a vertical axis of rotation of the «rotor in a bell» type are capable of converting low-speed wind into energy, and at a wind speed of 10 m/s, they produce a useful aerodynamic torque that is 25 % higher than the basic model without additional structures, which demonstrates the feasibility of their use in hard-to-reach recreational sites in the Altai Republic.

**Keywords:** wind energy, electricity consumption, electricity losses, «rotor in a bell» design, vortex-type installation.

Согласно данным, предоставленным крупнейшей независимой информационно-консалтинговой компанией Enerdata [1], мировое потребление электроэнергии за пять лет в период с 2019 по 2023 г. увеличилось на 9,75 % (рисунок 1) и на конец 2023 г. составило 25758 ТВт·ч. При этом потребление электроэнергии в Российской Федерации в этот же период увеличилось на 7,09 % (рисунок 2) [1].

Стремительный рост значений потребления электрической энергии связан не только с развитием промышленности и изменением численности населения, которое в 2022 г. преодолело рубеж в 8 миллиардов человек [2], но и с развитием иных отраслей, прямо или косвенно связанных с потреблением электрической энергии. Одной из таких отраслей является туристическая отрасль, которая в настоящее время является одним из стратегических направлений экономики на мировом рынке.

Многие субъекты Российской Федерации обладают значимыми ресурсами для развития туристической отрасли, и на сегодняшний день Правительство РФ определяет данную индустрию как стратегическое направление развития экономики [3]. Правительством Российской Федерации, а также местными органами самоуправления определен ряд программ, направленных на стратегическое развитие в сфере туризма, в частности, в сибирском субъекте – Республике Алтай. Так, с целью формирования имиджа региона как центра всесезонного туризма, а также развития межрегионального и международного сотрудничества, повышения конкурентоспособности туристического продукта на российском

и зарубежном рынках, развития туристической инфраструктуры, повышения доступности туристических продуктов, совершенствование управления в сфере туризма Правительством Российской Федерации определен ряд нормативных документов, таких как национальный проект «Туризм и индустрия гостеприимства» [4]; государственная программа Республики Алтай «Развитие внутреннего и въездного туризма», утвержденная решением Правительства Республики Алтай (протокол заседания Правительства Республики Алтай от 25 октября 2023 г. № 13) [5] и т. д.

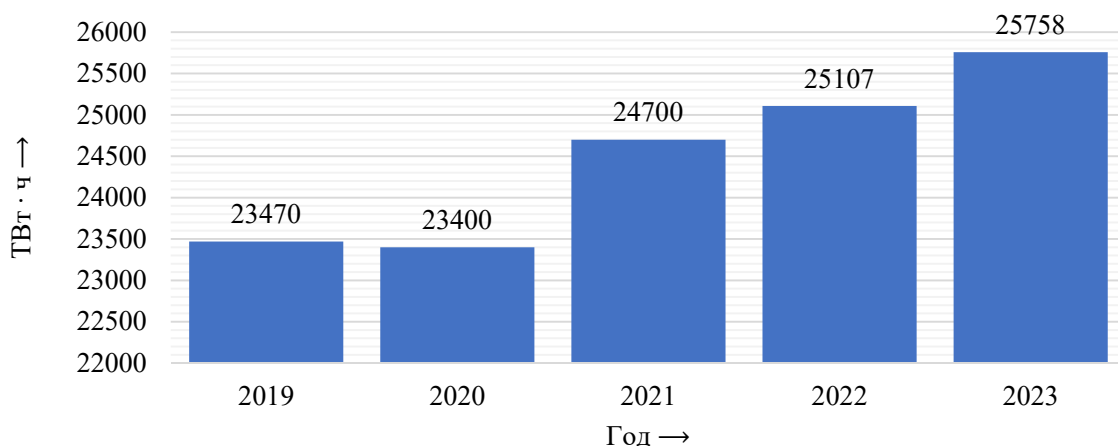


Рисунок 1 – Динамика изменения потребления электроэнергии за период с 2019 по 2023 г. в мире

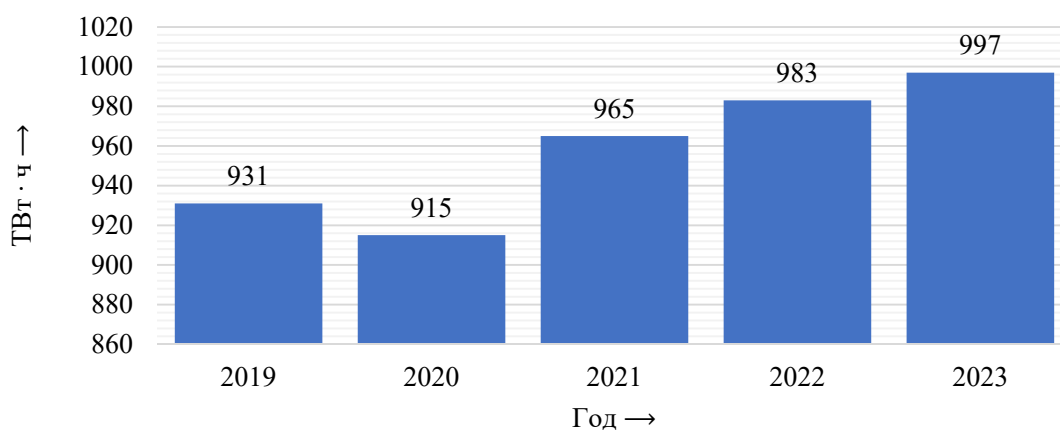


Рисунок 2 – Динамика изменения потребления электроэнергии за период с 2019 по 2023 г. в России

Для развития рекреационных объектов, в том числе расположенных в труднодоступных районах, что характерно для Республики Алтай, требуется надежное и непрерывное электроснабжение, но специфический ландшафт территории данного региона, более 80 % территории которой занято горными хребтами, затрудняет классический способ электроснабжения. Горная местность затрудняет или вовсе не позволяет установку преобразующего оборудования, а чрезмерно протяженные линии электропередач низкого напряжения (0,4 кВ и ниже) в совокупности с климатическими факторами увеличивают и так высокие значения потерь электроэнергии в данном регионе [6].

Так, в соответствии с официальным годовым отчетом ПАО «Россети Сибирь» за 2022 г., размещенным в открытом доступе, в таблице 1 приведены фактические потери филиала «Горно-Алтайские электрические сети», являющегося филиалом сетевой организации, расположенной в Республике Алтай, на 2021 г. составили 14,07 %, что на 6,76 % выше среднего значения по ПАО «Россети Сибирь» [6], а также данные показатели в соответствии

# Энергетические системы и комплексы

с таблицей 2 превышают значения нормативов потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям территориальных сетевых организаций [7].

Таблица 1 – Фактические потери электрической энергии в ПАО «Россети Сибирь»

Наименование филиала или дочернего зависимого общества	Потери электрической энергии	
	факт 2021 г.	
	млн кВт · ч	%
Алтайэнерго	494,09	6,50
Бурятэнерго	542,45	11,58
ГАЭС	82,16	14,07
Красноярскэнерго	1394,65	10,05
Кузбассэнерго-РЭС	527,45	3,42
Омскэнерго	590,33	6,79
Хакасэнерго	225,52	7,57
Читаэнерго	546,84	8,63
ПАО «Россети Сибирь»	4403,48	7,31

Таблица 2 – Нормативы потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям территориальных сетевых организаций

Отпуск электрической энергии в электрическую сеть/суммарная протяженность воздушных и кабельных линий электропередачи в одноцепном выражении, тыс. кВт · ч/км	Соотношение величины отпуска электрической энергии в электрическую сеть и суммы номинальных мощностей силовых трансформаторов, тыс. кВт · ч/МВ · А	Значение норматива потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям территориальных сетевых организаций, %
<b>Высокое напряжение</b>		
3500 и менее	2 000 и менее	5,02
3500 и менее	Более 2 000	4,75
Более 3500	2 000 и менее	3,33
Более 3500	Более 2 000	2,30
<b>Среднее первое напряжение</b>		
700 и менее	2 000 и менее	5,77
700 и менее	Более 2 000	4,96
Более 700	2 000 и менее	5,45
Более 700	Более 2 000	4,07
Доля протяженности воздушных линий электропередачи в одноцепном выражении в суммарной протяженности воздушных и кабельных линий электропередачи в одноцепном выражении, %	Соотношение величины отпуска электрической энергии в электрическую сеть и суммы номинальных мощностей силовых трансформаторов, тыс. кВт · ч/МВ · А	Значение норматива потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям территориальных сетевых организаций, %
<b>Среднее второе напряжение</b>		
Более 30	2 000 и менее	8,49
Более 30	Более 2 000	7,36
30 и менее	2 000 и менее	6,17
30 и менее	Более 2 000	6,08
Доля протяженности воздушных линий электропередачи в одноцепном выражении в суммарной протяженности воздушных и кабельных линий электропередачи в одноцепном выражении <1>, %	Значение норматива потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям территориальных сетевых организаций, %	
<b>Низкое напряжение</b>		
Более 30	13,49	
30 и менее	10,49	

Таким образом, строительство электросетевых объектов, повышающих потери электроэнергии, не соответствует концепции ПАО «Россети Сибирь», направленной на их снижение.

Ввиду изложенного выше для электроснабжения отдельных рекреационных объектов, расположенных в труднодоступных районах, становятся актуальными альтернативные источники энергии. При этом развитие «зеленой энергии» на территории Российской Федерации определено рядом государственных программ, одним из таких документов являются «Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2035 года», утвержденные распоряжением Правительства Российской Федерации от 8 января 2009 г. №1-р [8].

Одним из наиболее экологически чистых, что немаловажно для данного региона, возобновляемым источником энергии является ветер.

В соответствии с данными, предоставленными компанией EnergyWind [9], среднегодовая скорость ветра (на высоте 10 м) на территории Республики Алтай составляет 1,26 м/с и в различных районах Республики колеблется от 0,7 до 2,0 м/с (таблица 3) [9]. При этом пиковые значения скорости ветра доходят до 20 – 28 м/с. Ввиду высокой амплитуды колебания скорости ветровых потоков для электроснабжения требуются установки, работающие при низкой скорости ветра, при этом способные выдерживать пиковые нагрузки до 30 м/с.

Таблица 3 – Карта ветров в Республике Алтай

Местоположение метеостанции	Среднегодовая скорость ветра	Средняя скорость ветра (м/с)				Макс. значение скорости ветра (м/с)
		зима	весна	лето	осень	
г. Горно-Алтайск	1,2	1,0	1,4	1,3	1,3	20
с. Артыбаш	1,7	2,1	1,5	1,2	1,8	21
с. Катанда	1,3	0,7	1,6	1,4	1,3	23
с. Кош-Агач	1,2	0,4	1,9	1,5	1,0	28
с. Майма	2,0	1,5	2,6	2,1	1,9	25
с. Онгудай	0,7	0,4	0,9	0,8	0,6	21
с. Турочак	0,9	0,4	1,3	1,1	0,9	28
с. Усть-Кан	1,0	0,8	1,3	1,0	0,9	24
с. Усть-Кокса	1,1	0,7	1,6	1,4	1,1	21
с. Чемал	1,1	1,3	0,9	0,8	1,1	24
с. Шебалино	1,7	1,4	2,0	1,7	1,7	26

Для данного региона целесообразно применение ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения, имеющих низкую скорость запуска ротора и не зависящих от направления ветра. Ввиду того, что у таких установок имеется возможность установки редуктора с генератором в нижней части, это добавляет еще одно преимущество в виде удешевления конструкции [10].

Одной из перспективных моделей является разработанная ветроэнергетическая установка вихревого типа с вертикальной осью вращения с типом компоновки «ротор в раструбе» (рисунок 3) [11].

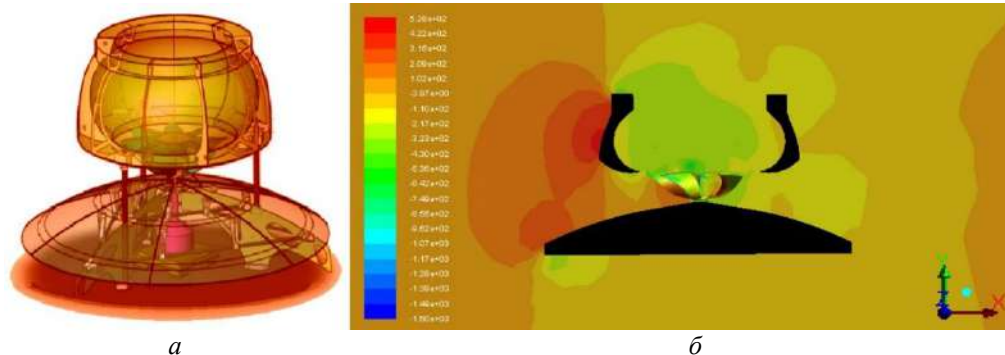


Рисунок 3 – Ветроэнергетическая установка вихревого типа с вертикальной осью вращения с оптимизированной компоновкой «ротор в раструбе»: 3D-модель (а) и распределение избыточного статического давления в плоскости OXY (б)

Данная модель имеет аэродинамический винт, конструкция которого рассчитана в соответствии с CFD-анализом и имеет оптимизированную конструкцию раструба. Оптимальная геометрия конструкции получена путем CFD-оптимизации в программном комплексе Ansys Fluent [11].

В качестве теоретического базиса CFD-анализа взято уравнение Навье – Стокса:

$$\begin{cases}
 \frac{dV_x}{dt} = -\left(\frac{1}{\rho}\right)\frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\mu}{\rho}\right)\Delta V_x + \left(\frac{\mu}{3\rho}\right)\frac{\partial}{\partial x} \operatorname{div}\bar{V} + \\
 + \left(\frac{1}{\rho}\right)\left[\frac{\partial\mu}{\partial x}\left(2\frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{2}{3}\operatorname{div}\bar{V}\right) + \frac{\partial\mu}{\partial y}\left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial\mu}{\partial z}\left(\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x}\right)\right]; \\
 \frac{dV_y}{dt} = -\left(\frac{1}{\rho}\right)\frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\mu}{\rho}\right)\Delta V_y + \left(\frac{\mu}{3\rho}\right)\frac{\partial}{\partial y} \operatorname{div}\bar{V} + \\
 + \left(\frac{1}{\rho}\right)\left[\frac{\partial\mu}{\partial y}\left(2\frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{2}{3}\operatorname{div}\bar{V}\right) + \frac{\partial\mu}{\partial z}\left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y}\right) + \frac{\partial\mu}{\partial x}\left(\frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y}\right)\right]; \\
 \frac{dV_z}{dt} = -\left(\frac{1}{\rho}\right)\frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{\mu}{\rho}\right)\Delta V_z + \left(\frac{\mu}{3\rho}\right)\frac{\partial}{\partial z} \operatorname{div}\bar{V} + \\
 + \left(\frac{1}{\rho}\right)\left[\frac{\partial\mu}{\partial z}\left(2\frac{\partial V_z}{\partial z} - \frac{2}{3}\operatorname{div}\bar{V}\right) + \frac{\partial\mu}{\partial x}\left(\frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z}\right) + \frac{\partial\mu}{\partial y}\left(\frac{\partial V_z}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial z}\right)\right],
 \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho = \rho(x, y, z)$ ,  $p = p(x, y, z)$  – поля плотности и давления соответственно;  $\bar{V} = (x, y, z) = (V_x, V_y, V_z)$  – поле скоростей, имеющее векторные значения;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости.

Полезная аэродинамическая мощность ветрового потока есть произведение аэродинамического момента и угловой скорости вращения ротора, т. е.  $P = M_{\text{ось}} \cdot \omega$ . Для получения максимально эффективной конструкции раструба необходимо обеспечить максимальное значение полезной мощности при заданном диапазоне скорости ветрового потока и угловой скорости вращения ротора (таблица 4).

Таблица 4 – Исходные (начальные) параметры ветроэнергетической установки

Элемент установки	Высота, м	Макс. диаметр, м	Мин. диаметр, м
Винт (ротор)	0,32	1,25	–
Раструб	0,428	2,23 (нижний)	1,16 (верхний)
Скорость ветрового потока, м/с		Угловая скорость вращения ротора, рад/с	
3 – 10		0,5 – 14	

Критерием оптимизации является максимум среднего значения полезной мощности ветроэнергетической установки  $\langle P \rangle$  на множестве  $Q$  допустимых комбинаций в соответствии с заданными диапазонами  $\{V, \omega\} \in Q$ :

$$\langle P \rangle_Q \Big|_{U_{geo, opt}} = \max_{\{U_{geo}\}} \left[ \langle P \rangle_Q \Big|_{U_{geo}} \right], U_{geo} \rightarrow U_{geo, opt}, \quad (2)$$

где  $U_{geo}$  – одна из множества произвольных форм раструба в компоновке «ротор в раструбе».

По результатам моделирования путем CFD-оптимизации в программном комплексе Ansys, а также численного моделирования выявлена оптимальная модель раструба в компоновке с заданным ротором. Функциональная схема методики выбора наилучшей формы конструкции представлена на рисунке 4 [11].



Рисунок 4 – Методика CFD-оптимизации в программном комплексе Ansys

После выбора оптимальной конструкции раструба в компоновке «ротор в раструбе» с целью сравнительного анализа целесообразности полученного результата взяты две ветроэнергетические установки, имеющие идентичную модель винта, первая из которых не имеет вспомогательных конструкций, а вторая в своей компоновке имеет оптимизированный в соответствии с рекомендациями работы [11] раструб. Моделирование аэродинамического потока производилось методом скользящих сеток с числом ячеек более одного миллиона элементов в условиях скорости потока ветра, равной  $V = 10$  м/с, и угловой скорости вращения ротора, равной 6,28 рад/с. При этом вектор скорости ветра направлен по оси  $X$ .

По итогу расчета по двум вариантам воздействующий на ротор момент составил:

- для компоновки «ротор без раструба»  $M (M_x, M_z, M_y) = (4,65; 5,83; \mathbf{3,83})$  Н·м;
- для компоновки «ротор в раструбе»  $M (M_x, M_z, M_y) = (4,10; 2,84; \mathbf{4,65})$  Н·м.

Дополнительная вертикальная тяга по оси  $Y$ , вызванная законом Бернулли, позволяет значительно повысить вращательный момент винта.

Полезная аэродинамическая мощность ветрового потока рассчитывается по формуле

$$P_{BY} = M_y(V, \omega) \cdot \omega \cdot \langle \eta_{red} \rangle \cdot \langle \eta_{gen} \rangle, \quad (3)$$

где  $\langle \eta_{red} \rangle$  и  $\langle \eta_{gen} \rangle$  – средние значения коэффициента полезного действия редуктора и генератора соответственно, приняты значения в диапазоне  $\langle \eta_{red} \rangle = 0,9 - 0,95$ ;  $\langle \eta_{gen} \rangle = 0,7 - 0,9$  [13].

При заданных одинаковых условиях в модели с компоновкой «ротор в раструбе» полезный аэродинамический момент вращения был увеличен (таблица 5).

Таблица 5 – Значения полезной аэродинамической мощности воздействия ветрового потока на ротор

Компоновка	$M_y$ , Н·м	Скорость ветрового потока, м/с	
		10	1,26 (Республики Алтай)
Компоновка установки «ротор без раструба»	3,83	19,48	2,54
Компоновка установки «ротор в раструбе»	4,65	23,65	2,69

Так как мощность ветроэнергетической установки прямо пропорциональна, с учетом габаритных параметров ротора, полезной аэродинамической мощности воздействия ветрового

потока на ротор, то на основании формулы (3) мощность ветроэнергетической установки увеличивается пропорционально моменту вращения ротора, таким образом, при помощи раструба с оптимизированной конструкцией можно увеличить выходные характеристики установки с минимальными затратами ввиду низких как финансовых, так и материальных трудозатрат для оптимизации ветроэнергетической установки.

По данным таблицы 5 видно, что компоновка «ротор в раструбе» позволяет увеличить полезную аэродинамическую мощность воздействия ветрового потока на ротор не только при высоких скоростях ветра, но и при низких. Так, для Республики Алтай при среднегодовой скорости ветра 1,26 м/с компоновка «ротор в раструбе» позволяет увеличить полезную аэродинамическую мощность примерно на 6 %, а при скорости ветра 10 м/с – почти на четверть.

В соответствии со статьей [12] данная ветроэнергетическая установка способна выдерживать ветровые нагрузки до 30 м/с. При этом за счет оптимизированной конструкции раструба данная модель увеличивает полезный аэродинамический момент вращения на четверть по сравнению с моделью без раструба [13].

**Выводы и заключение.** Туристическая отрасль стала стратегическим направлением развития экономики. И в настоящее время Республика Алтай становится одним из крупнейших туристических регионов Российской Федерации. Из предоставленных данных видно, что ввиду высокого уровня потерь в регионе требуется бдительный контроль и технико-экономически целесообразное проектирование схем электроснабжения рекреационных объектов с целью недопущения роста и так высокого уровня потерь электроэнергии.

При проектировании схем электроснабжения рекреационных объектов, расположенных в труднодоступных местах, целесообразно применять ветроэнергетические установки. И в соответствии с климатическими условиями региона одним из наиболее актуальных решений является применение ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения с системой оптимизированной конструкции раструба, а именно «ротор в раструбе».

В соответствии с результатами моделирования и сравнения двух компоновок – «ротор без раструба» и «ротор в раструбе» – мы видим, что компоновка «ротор в раструбе» при скорости ветра в 10 м/с позволяет увеличить полезный аэродинамический момент вращения почти на четверть по сравнению с моделью без раструба, а, как следствие, и мощность ветроэнергетической установки. При этом такие установки позволяют в полной мере преобразовывать низкоскоростной ветер в энергию, так, при среднегодовой скорости ветра 1,26 м/с, что характерно для Республики Алтай, полезная аэродинамическая мощность воздействия ветрового потока на ротор в соответствии с результатами исследования, может быть увеличена на 6 %, при этом вспомогательная конструкция не требует значительных как финансовых, так и материальных трудозатрат. Данные установки способны выдерживать ветровые нагрузки до 30 м/с, что соответствует ветровым особенностям данного региона.

Таким образом, ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения с компоновкой «ротор в раструбе» имеют повышенные выходные характеристики и являются принципиально новым решением для схем электроснабжения рекреационных объектов, расположенных в труднодоступных местах Республики Алтай.

### *Список литературы*

1. Статистический ежегодник мировой энергетики 2024 // Enerdata : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://yearbook.enerdata.ru/> (дата обращения: 08.06.2024).
2. Население земли – счетчик населения земли // Countrymeters : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://countrymeters.info/ru/World/> (дата обращения: 10.06.2024).
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20.09.2019 № 2129-р (ред. от 07.02.2022) «Об утверждении Стратегии развития туризма в Российской Федерации на период до 2035 года» // КонсультантПлюс : сайт. – Текст : электронный. – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_333756/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_333756/) (дата обращения: 16.06.2024).

4. Национальный проект «Туризм и индустрия гостеприимства» // Министерство экономического развития Российской Федерации : сайт. – Текст : электронный. – URL: [https://www.economy.gov.ru/material/directions/turizm/nacionalnyy\\_proekt\\_turizm\\_i\\_industriya\\_gostepriimstva/](https://www.economy.gov.ru/material/directions/turizm/nacionalnyy_proekt_turizm_i_industriya_gostepriimstva/) (дата обращения: 20.06.2024).

5. Решение Правительства Республики Алтай от 25.10.2023 № 13 «Об утверждении государственной программы Республики Алтай «Развитие внутреннего и въездного туризма»» // Министерство финансов Республики Алтай : сайт. – Текст : электронный. – URL: [https://minfin-altai.ru/files/2023/11/1\\_20231101-23\\_pasport-gp\\_minfina-ra.pdf/](https://minfin-altai.ru/files/2023/11/1_20231101-23_pasport-gp_minfina-ra.pdf/) (дата обращения: 20.06.2024).

6. Годовые отчеты ПАО «Россети Сибирь» // ПАО «Россети Сибирь» : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.rosseti-sib.ru/about/dokumenty-about/godovye-otchety/> (дата обращения: 20.06.2024).

7. Приказ Минэнерго России от 26.09.2017 № 887 «Об утверждении нормативов потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям территориальных сетевых организаций» // КонсультантПлюс : сайт. – Текст : электронный. – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_280799/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_280799/) (дата обращения: 20.06.2024).

8. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 08.01.2009 № 1-р (ред. от 03.05.2024) «Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2035 года» // КонсультантПлюс : сайт. – Текст : электронный. – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_83805/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_83805/) (дата обращения: 20.06.2024).

9. Карта ветров России // EnergyWind : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://energywind.ru/recomendacii/karta-rossii/sibir/respublika-altaj/> (дата обращения: 21.06.2024).

10. Разработка теории и методов повышения эффективности аэродинамической мощности ветроэнергетической установки с изменяемой геометрией / В. А. Костюков, А. М. Маевский Н. К. Полуянович, М. Н. Дубяго. – Текст : непосредственный // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций «РТ-2017» : материалы международной молодежной научно-технической конференции / Севастопольский гос. ун-т. – Севастополь, 2017. – С. 179.

11. Исследование перспективной ветроэнергетической установки с типом компоновки «ротор в раструбе» / В. А. Костюков, М. Ю. Медведев, А. М. Маевский, Н. К. Полуянович. – Текст : непосредственный // Вестник донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17. – № 1 (88). – С. 85–91.

12. Костюков, В. А. Метод регулирования частоты вращения ротора ветроэнергетической установки за счет управления изменяемыми элементами геометрии / В. А. Костюков, А. М. Маевский, Н. К. Полуянович. – Текст : непосредственный // Федоровские чтения-2016 : материалы международной научно-практической конференции с элементами научной школы / МЭИ. – Москва, 2016. – С. 255–263.

13. Оптимизация форм геометрии раструба ветроэнергетической установки типа «ротор в раструбе» / В. А. Костюков, М. Ю. Медведев [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17. – № 4 (91). – С. 61–68.

### References

1. *Statisticheskij yezhegodnik mirovoy energetiki 2024* [World Energy Statistical Yearbook 2024]. Available at: <https://yearbook.enerdata.ru/> (accessed: 08.06.2024).

2. *Naseleniye zemli – schetchik naseleniya zemli* [Earth population – Earth population counter]. Available at: <https://countrymeters.info/ru/World/> (accessed: 10.06.2024).

3. *Rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 20.09.2019 № 2129-r (red. ot 07.02.2022) «Ob utverzhdenii Strategii razvitiya turizma v Rossiyskoy Federatsii na period do 2035 goda»* [Order of the Government of the Russian Federation of 20.09.2019 №. 2129-r (as amended on 07.02.2022) «On approval of the Strategy for the development of tourism in the Russian Federation for the period up to 2035»]. Available at: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_333756/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_333756/) (accessed: 16.06.2024).

4. *Natsional'nyy proyekt «Turizm i industriya gostepriimstva»* [National project «Tourism and hospitality industry»]. Available at: [https://www.economy.gov.ru/material/directions/turizm/nacionalnyy\\_proekt\\_turizm\\_i\\_industriya\\_gostepriimstva/](https://www.economy.gov.ru/material/directions/turizm/nacionalnyy_proekt_turizm_i_industriya_gostepriimstva/) (accessed: 20.06.2024).

5. *Resheniye Pravitel'stva Respubliki Altay ot 25.10.2023 № 13 «Ob utverzhdenii gosudarstvennoy programmy Respubliki Altay «Razvitiye vnutrennego i v"yezdnoy turizma»»* [Resolution of the Government of the Altai Republic of 25.10.2023 № 13 «On approval of the state program of the Altai Republic «Development of domestic and inbound tourism»»]. Available at: [https://minfin-altai.ru/files/2023/11/1\\_20231101-23\\_pasport-gp\\_minfina-ra.pdf/](https://minfin-altai.ru/files/2023/11/1_20231101-23_pasport-gp_minfina-ra.pdf/) (accessed: 20.06.2024).

6. *Godovyye otchety PAO «Rosseti Siber'»* [Annual reports of PJSC «Rosseti Siberia»]. Available at: <https://www.rosseti-sib.ru/about/dokumenty-about/godovye-otchety/> (accessed: 20.06.2024).

7. *Prikaz Minenergo Rossii ot 26.09.2017 № 887 «Ob utverzhdenii normativov poter' elektricheskoy energii pri yeye peredache po elektricheskim setyam territorial'nykh setevykh organizatsiy»* [Order of the Ministry of Energy of Russia of 26.09.2017 № 887 «On approval of standards for losses of electrical energy during its transmission through electrical networks of territorial grid organizations»]. Available at: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_280799/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_280799/) (accessed: 20.06.2024).

8. *Rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 08.01.2009 № 1-r (red. ot 03.05.2024) «Ob osnovnykh napravleniyakh gosudarstvennoy politiki v sfere povysheniya energeticheskoy effektivnosti elektroenergetiki na osnove ispol'zovaniya vozobnovlyayemykh istochnikov energii na period do 2035 goda»* [Order of the Government of the Russian Federation of 08.01.2009 № 1-r (as amended on 03.05.2024) «On the main directions of state policy in the sphere of increasing the energy efficiency of the electric power industry based on the use of renewable energy sources for the period up to 2035»]. Available at: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_83805/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_83805/) (accessed: 20.06.2024).

9. *Karta vetrov Rossii* [Wind map of Russia]. Available at: <https://energywind.ru/recomendacii/karta-rossii/sibir/respublika-altaj/> (accessed: 21.06.2024).

10. Kostyukov V.A., Mayevsky A.M., Poluyanovich N.K., Dubyago M.N. [Development of theory and methods for increasing the efficiency of aerodynamic power of a wind turbine with variable geometry]. *Sovremennyye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy «RT-2017»: materialy mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern problems of radio electronics and telecommunications «RT-2017»: materials of the international youth scientific and technical conference]. Sevastopol, 2017, p. 179 (In Russian).

11. Kostyukov V.A., Medvedev M.Yu., Mayevsky A.M., Poluyanovich N.K. Study of a promising wind turbine with a «rotor in a bell» configuration. *Vestnik donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Don State Technical University*, 2017, vol. 17, no. 1 (88), pp. 85-91 (In Russian).

12. Kostyukov V.A., Mayevsky A.M., Poluyanovich N.K. [Method for regulating the rotation speed of a wind turbine rotor by controlling variable geometric elements]. *Fedorovskiye chteniya-2016: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s elementami nauchnoy shkoly* [Fedorov Readings-2016: proceedings of the international scientific and practical conference with elements of a scientific school]. Moscow, 2016, pp. 255-263 (In Russian).

13. Kostyukov V.A., Medvedev M.Yu., Mayevsky A.M., Poluyanovich N.K., Savchenko V.V. Optimization of the geometry forms of the bell-type wind turbine «rotor in a bell». *Vestnik donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Don State Technical University*, 2017, vol. 17, no. 4 (91), pp. 61-68 (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Бубенчиков Антон Анатольевич

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», ОмГТУ.

Тел.: +7 (913) 978-03-32.

E-mail: [privetomsk@mail.ru](mailto:privetomsk@mail.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Bubenchikov Anton Anatolyevich

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira av., Omsk, 644050, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Power Supply of Industrial Enterprises», OmSTU.

Phone: +7 (913) 978-03-32.

E-mail: [privetomsk@mail.ru](mailto:privetomsk@mail.ru)

## Киселёв Глеб Юрьевич

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», ОмГТУ.

Тел.: +7 (908) 108-42-82.

E-mail: gleb\_970519@mail.ru

## Kiselyov Gleb Yurievich

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira av., Omsk, 644050, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Power Supply of Industrial Enterprises», OmSTU.

Phone: +7 (908) 108-42-82.

E-mail: gleb\_970519@mail.ru

## Дорогов Борис Борисович

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», ОмГТУ.

Тел.: +7 (950) 210-19-17.

E-mail: boris.dorogov.75@mail.ru

## Dorogov Boris Borisovich

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira av., Omsk, 644050, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Power Supply of Industrial Enterprises», OmSTU.

Phone: +7 (950) 210-19-17.

E-mail: boris.dorogov.75@mail.ru

## Гаибов Иван Андреевич

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», ОмГТУ.

Тел.: +7 (950) 792-58-34.

E-mail: vanyayes@gmail.com

## Gaibov Ivan Andreevich

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira av., Omsk, 644050, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Power Supply of Industrial Enterprises», OmSTU.

Phone: +7 (950) 792-58-34.

E-mail: vanyayes@gmail.com

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Применение ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения типа «ротор в растребе» в целях электроснабжения объектов в Республике Алтай / А. А. Бубенчиков, Г. Ю. Киселёв, Б. Б. Дорогов, И. А. Гаибов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 3 (59). – С. 86 – 96.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Bubenchikov A.A., Kiselyov G.Yu., Dorogov B.B., Gaibov I.A. Application of vertical axis wind power turbines of the «rotor in a bell» type for power supply of facilities in the Altai Republic. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 3 (59), pp. 86-96 (In Russian).

УДК 621.331: 621.372.21

**Т. В. Ковалева, А. А. Комяков, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова, А. М. Чулембаев**

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

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

**Аннотация.** В статье выполнен анализ показателей качества электроэнергии и электромагнитной совместимости со смежными устройствами на основе определения гармонического спектра напряжения и тока в любой точке рассматриваемой системы путем имитационного моделирования. В качестве инструмента для разработки модели выбрана среда динамического моделирования SimInTech, в которой создана виртуальная модель системы электроснабжения тяговой сети постоянного тока. Разработанная модель расчетного участка, включающая в себя источник несимметричного и несинусоидального трехфазного напряжения, понижающий и преобразовательный трансформаторы, двенадцатипульсовый выпрямитель последовательного типа, сглаживающий фильтр, позволяет выполнить анализ динамических процессов в системе тягового электроснабжения с учетом движения электропоездов. Линии электропередачи и тяговая сеть представляют собой цепи с распределенными параметрами, в которых при исследовании необходимо учитывать

стационарные волновые процессы, которые приводят к дополнительным потерям электроэнергии и ухудшению работы устройств электроснабжения и электроподвижного состава. У современных электровозов с асинхронными тяговыми двигателями наличие инверторов в тяговом преобразователе приводит к искажению напряжения и тока в контактной сети. Нестационарные волновые процессы в тяговой сети с такими электровозами усиливают ее мешающее влияние на смежные устройства больше, чем электровозы с коллекторными тяговыми двигателями. Многовариантное моделирование позволяет выявить основные факторы, влияющие на искажение синусоидальности кривой напряжения и тока и выполнить оценку их значимости методами корреляционного анализа. Сформированы математические модели, позволяющие прогнозировать показатели качества электроэнергии, связанные с несимметрией и несинусоидальностью напряжения. Приведенная модель и алгоритм исследования могут быть применены при проектировании новых и модернизации существующих тяговых подстанций железных дорог постоянного тока.

**Ключевые слова:** несимметрия и несинусоидальность напряжения, система тягового электроснабжения, постоянный ток, показатели качества электроэнергии, имитационное моделирование.

**Tatiana V. Kovaleva, Alexander A. Komyakov, Olga O. Komyakova, Natalia V. Pashkova, Amanzhol M. Chulembaev**

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

## FORECASTING ELECTRICITY QUALITY INDICATORS IN RAILWAY POWER SUPPLY SYSTEMS

**Abstract.** The article analyzes the indicators of power quality and electromagnetic compatibility with adjacent devices based on determining the harmonic spectrum of voltage and current at any point in the system under consideration using simulation modeling. The SimInTech dynamic modeling environment was chosen as a tool for developing the model, in which a virtual model of the power supply system of a DC traction network was created. The developed model of the design section, including a source of asymmetrical and non-sinusoidal three-phase voltage, step-down and converter transformers, a twelve-pulse series-type rectifier, and a smoothing filter, makes it possible to analyze dynamic processes in the traction power supply system, taking into account the movement of electric locomotives. Power lines and traction networks are circuits with distributed parameters which the study must take into account stationary wave processes which lead to additional losses of electricity and deterioration both of the power supply devices and electric rolling stock operation. In modern electric locomotives with asynchronous traction motors, the presence of inverters in the traction converter leads to a distortion of voltage and current in the contact network. Unsteady wave processes in the traction network with such electric locomotives enhance its interfering effect on adjacent devices more than electric locomotives with commutator traction motors. Multivariate modeling allows to identifying the main factors influencing the distortion of the sinusoidality of the voltage and current curve and evaluate their significance using correlation analysis methods. Mathematical models have been generated that make it possible to predict power quality indicators associated with voltage asymmetry and non-sinusoidality. The presented model and research algorithm can be applied in the design of new traction substations of DC railways and the modernization of existing ones.

**Keywords:** traction power supply system, direct current, voltage asymmetry and non-sinusoidality, power quality indicators, simulation modeling.

Современная электроэнергетическая система характеризуется ростом количества и мощностей приемников электрической энергии, ухудшающих ее качество. Все это порождает серьезную проблему обеспечения электромагнитной совместимости большого числа различных потребителей [1].

Система электроснабжения железных дорог постоянного тока при нормальных режимах работы оказывает мешающее электромагнитное влияние на смежные устройства. Гармоники выпрямленного напряжения, основными источниками которых являются многопульсовые выпрямители тяговых подстанций постоянного тока, обуславливают появление помех в смежных устройствах, расположенных вблизи тяговой сети. Для сглаживания гармоник напряжения в тяговой сети применяются сглаживающие фильтры на выходе тяговых подстанций. Система напряжений, питающая тяговые подстанции постоянного тока, является несимметричной и несинусоидальной. Несинусоидальность питающих напряжений определяется наличием в энергосистеме нелинейных нагрузок (трансформаторы, выпрямители и т. д.). Несимметрия напряжений питающей системы обусловлена неравномерной загрузкой фаз и может достигать 10 %. Режимы работы электрических систем при

наличии несимметрии и несинусоидальности напряжений считаются длительными нормальными нагрузочными режимами [2, 9].

Линии электропередачи и тяговая сеть представляют собой цепи с распределенными параметрами, в которых при исследовании необходимо учитывать стационарные волновые процессы. Волновые процессы приводят к дополнительным потерям электроэнергии и ухудшению работы устройств электроснабжения и электроподвижного состава [3].

Электровоз является сложной динамической нагрузкой. Особенностью современных электровозов с асинхронными тяговыми двигателями является наличие инверторов в тяговом преобразователе, которые приводят к искажению напряжения и тока в контактной сети. Нестационарные волновые процессы в тяговой сети с такими электровозами усиливают мешающее влияние на смежные устройства больше, чем электровозы с коллекторными тяговыми двигателями.

Целью настоящего исследования является анализ электромагнитных процессов в описанной выше системе электроснабжения железных дорог постоянного тока, представляющий собой сложную многокритериальную задачу, которая может быть решена с помощью технологий имитационного моделирования. Выполненный анализ позволит спрогнозировать показатели качества электроэнергии, которые необходимы при проектировании новых и модернизации существующих систем электроснабжения железнодорожного транспорта.

Для оценки показателей качества электроэнергии и электромагнитной совместимости со смежными устройствами необходимо определение гармонического спектра напряжения и тока в любой точке рассматриваемой системы. В среде динамического моделирования *SimInTech* создана виртуальная модель системы электроснабжения тяговой сети постоянного тока с движущимся электровозом с учетом распределенных параметров линии электропередачи и тяговой сети на основе блок-схемы, приведенной на рисунке 1. В модели для измерения значений напряжений и токов в любой точке системы используются однофазные и трехфазные измерительные приборы, для определения формы и гармонического спектра сигналов применяются осциллографы и анализаторы спектрального состава.

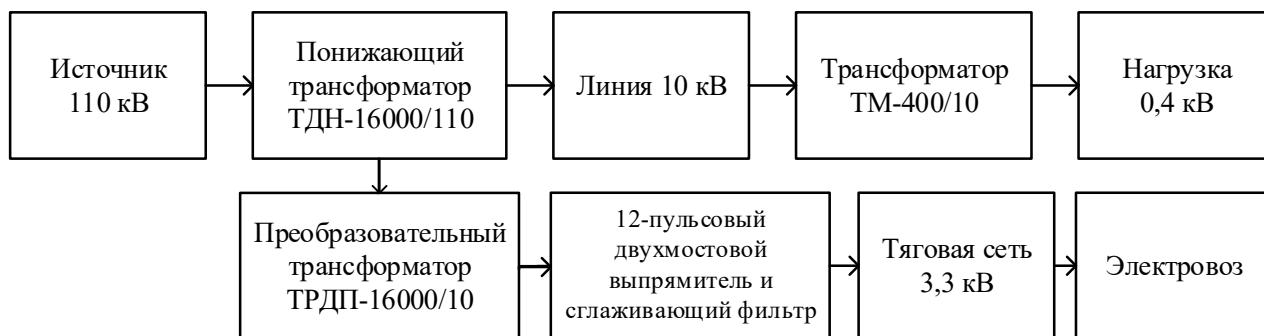


Рисунок 1 – Блок-схема системы электроснабжения тяговой сети постоянного тока

Библиотека программы *SimInTech* содержит блок «Источник напряжения трехфазный», на выходе которого напряжения фаз синусоидальны. Для моделирования процессов в системе электроснабжения при различной форме питающего напряжения создан трехфазный источник с задаваемыми параметрами несимметрии и несинусоидальности (рисунок 2). Модель позволяет задавать функцию напряжения с любым количеством гармоник прямой, обратной и нулевой последовательностей при различных коэффициентах несимметрии. Для примера на рисунке 2 приведена осциллограмма напряжения, соответствующая функции, которая содержит 10 гармоник ряда Фурье при коэффициенте несимметрии 2 %.

Модель содержит блоки «Трансформатор трехфазный трехобмоточный», «Трансформатор трехфазный двухобмоточный» библиотеки программы *SimInTech*, учитывающие нелинейные свойства реальных трансформаторов. В качестве задаваемых параметров были использованы справочные данные для трансформаторов ТДН 16000/110, ТРДП-16000/10 и ТМ-400/10 [4].

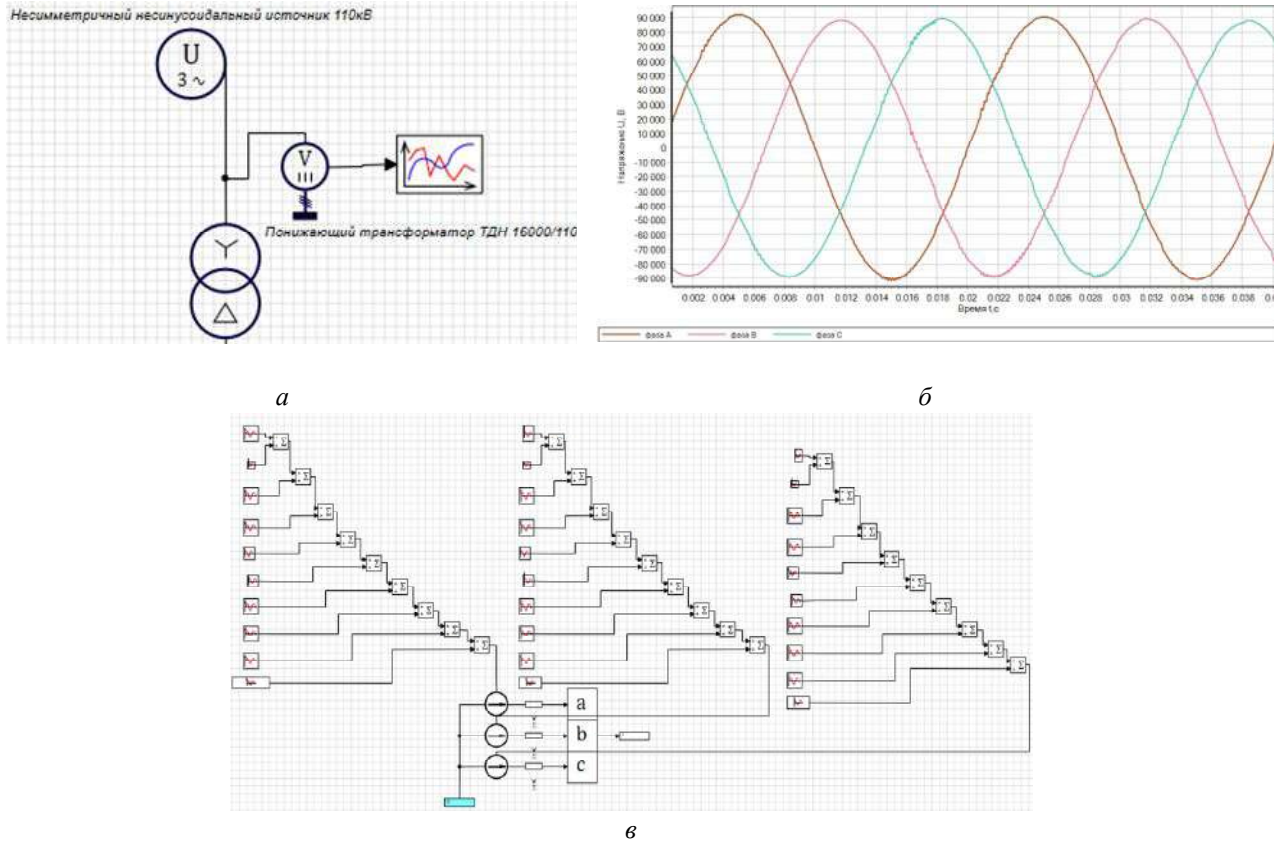


Рисунок 2 – Модель (а), осциллограмма (б) и схема замещения (в) трехфазного источника несимметричного несинусоидального напряжения

Мостовой двенадцатипульсовый выпрямитель последовательного типа был создан при помощи двух последовательно соединенных блоков «Преобразователь трехфазный мостовой» с реальными параметрами из библиотеки программы *SimInTech* (рисунок 3). Параметры реактора и резонансно-аперриодического фильтра на выходе выпрямителя задаются в соответствии с несимметрией и несинусоидальностью питающих напряжений.

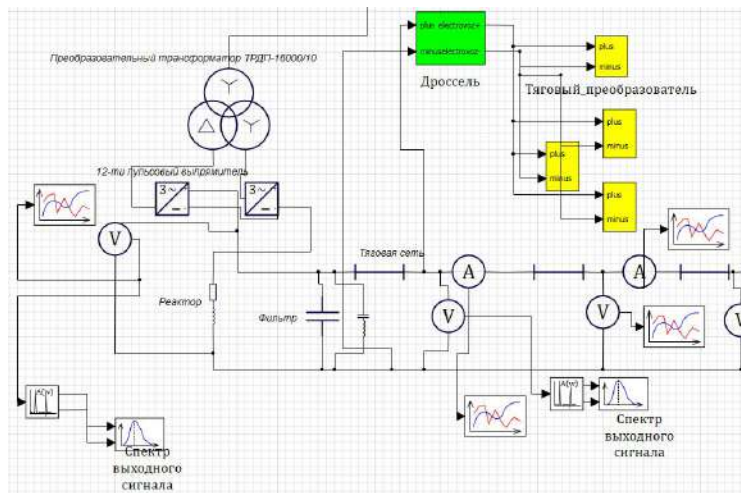


Рисунок 3 – Элемент модели тяговой сети постоянного тока

Модель трехфазной линии электропередачи переменного тока напряжением 10 кВ, питающей нетяговые потребители, представлена блоком «Трехфазная линия электропередачи», имитирующим цепь с распределенными параметрами. При моделировании можно варьировать длину линии, количество элементарных участков с заданными первичными параметрами на единицу длины. Первичные параметры модели указанной линии соответствуют справочным данным для провода АС-50 [4].

Трехфазная нагрузка, соответствующая нетяговым потребителям, получает питание от тяговой подстанции по трехфазной линии электропередачи напряжением 10 кВ и в модели представлена активно-индуктивной нагрузкой (блок «PQ»), позволяющей задавать ее различный характер и величину.

Для создания модели тяговой сети постоянного тока напряжением 3,3 кВ использованы блоки «Линия электропередачи». Для учета динамических особенностей работы электровоза тяговая сеть представлена набором блоков, имитирующих отдельные ее участки, что позволяет выполнять необходимые измерения параметров напряжения и тока в любой точке межподстанционной зоны. Первичные параметры модели контактной сети, определяемые на единицу длины, соответствуют справочным данным для типа подвески М-95+2МФ-100 [5]. Изменяя параметры блока, можно варьировать длину линии, количество элементарных участков с заданными первичными параметрами.

В качестве тяговой нагрузки рассмотрены два варианта электровозов: с коллекторным и асинхронным тяговыми двигателями. Модель электровоза с коллекторным двигателем представляет собой активно-индуктивную нагрузку. Примером электровоза с асинхронным тяговым двигателем является электровоз 2ЭС10 «Гранит». Каждая секция электровоза оборудована двумя тяговыми преобразователями. Разработанная модель тягового преобразователя (см. рисунок 3) включает в себя следующие элементы: асинхронный электродвигатель, инвертор, источник напряжения, дроссель, анализатор спектра на основе преобразования Фурье, широтно-импульсный модулятор на четыре канала с симметричным треугольным опорным сигналом и формированием защитных пауз [6].

Наиболее распространенной эффективной мерой защиты смежных устройств от мешающего электромагнитного влияния тяговой сети постоянного тока является применение на тяговых подстанциях сглаживающих фильтров. Выбранная схема апериодического сглаживающего фильтра соответствует применению двенадцатипульсовых выпрямителей. Недостатком ее является низкий коэффициент сглаживания гармоник с частотами до 300 Гц, что особенно существенно при большой несимметрии питающих напряжений (более 2 %). В этом случае необходимо применение резонансно-апериодического фильтра с резонансным контуром 100 Гц (см. рисунок 3).

Было проведено многовариантное моделирование в программе *SimInTech* с учетом типа двигателя электровоза (коллекторный тяговый двигатель и асинхронный тяговый двигатель), значения тока нагрузки (холостой ход, 1800 А, 3150 А), тока трехфазного короткого замыкания на шинах тяговой подстанции (1830 А, 3260 А, 6480 А), уровня несимметрии напряжений на шинах тяговой подстанции (0 %, 2 %, 10 %). Таким образом, к рассмотрению принято 54 варианта.

На основе проведенного многовариантного моделирования сформированы корреляционные матрицы (не приведены в статье), которые включают в себя следующие показатели: ток нагрузки электровоза  $I_{ЭПС}$ , ток трехфазного короткого замыкания на шинах тяговой подстанции  $I_{к.з.}$ , коэффициент несимметрии питающих напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$ , показатели качества электроэнергии на стороне нетяговых потребителей с напряжением 10 кВ (коэффициенты  $n$ -й гармонической составляющей тока и напряжения  $K_{(n)}$ , суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и тока  $K_U$  или  $K_I$ ).

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что ток трехфазного короткого замыкания на шинах тяговой подстанции практически не оказывает влияния на

искажение синусоидальности кривой сетевого тока (коэффициенты корреляции для большинства гармоник не превысили 0,12). В то же время наиболее значимым влияющим фактором оказался ток тяговой нагрузки: наблюдается существенная отрицательная связь между коэффициентом гармонических составляющих тока и  $I_{\text{пс}}$ . Таким образом, с увеличением тока тяговой нагрузки абсолютные значения гармоник сетевого тока возрастают, однако их относительные значения снижаются [7].

Несимметрия питающих напряжений имеет менее значимое влияние на  $K_I$  с коэффициентами корреляции от 0,27 до 0,32. Причем увеличение  $K_{2U}$  приводит к значительному снижению доли канонических гармоник тока (11-я, 13-я, 23-я, 25-я) и к перераспределению спектра в сторону соседних частот. Так, значительной положительной связью с  $K_{2U}$  обладают 9-я, 15-я и 19-я гармоники с коэффициентами корреляции не менее 0,7. Этот эффект сильнее проявляется у электровоза с асинхронным тяговым двигателем.

Однако в целом можно отметить, что разница в спектре сетевого тока между электровозами разных типов незначительна. Некоторое отличие в характере изменения наблюдается лишь для гармоники с частотой 950 Гц. С помощью критерия Фишера выполнен анализ однородностей выборок  $K_I$  для электровозов с коллекторным и асинхронным тяговым двигателем. Результаты проведенного анализа показывают, что расчетное значение критерия составило 1,41, а критическое значение – 2,27 при доверительной вероятности 0,95. Следовательно, нет оснований отвергать гипотезу об однородности рассматриваемых выборок.

Показатели несинусоидальности сетевого тока для электровозов с коллекторным и асинхронным тяговым двигателем отличаются незначительно, поэтому для оценки качества электроэнергии на шинах напряжением 10 кВ тяговой подстанции можно рассмотреть только один вариант, например, с коллекторным тяговым двигателем.

В отличие от сетевого тока на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения оказывают влияние все рассмотренные показатели. Наиболее значимым фактором оказалась несимметрия питающих напряжений, причем рост несимметрии приводит к снижению суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения за счет снижения вклада канонических гармоник (коэффициенты корреляции для 11-й, 13-й, 23-й и 25-й гармоник от –0,44 до –0,95).

Повышение тока тяговой нагрузки приводит к увеличению суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в основном за счет канонических гармоник. При этом гармоника, соответствующая частоте 150 Гц, уменьшается с увеличением тяговой нагрузки.

Уменьшение мощности системы внешнего электроснабжения (т. е. снижение тока трехфазного короткого замыкания) негативно сказывается на показателях качества электроэнергии (коэффициент корреляции –0,44).

На основе полученных данных сформированы математические модели, которые позволяют прогнозировать показатели качества электроэнергии, связанные с несинусоидальностью напряжения. Расчеты выполнены методом «последовательный с исключением» (обратный жадный алгоритм) в программе *Statistica*. Результаты приведены в таблице. Наибольший коэффициент детерминации наблюдается для канонических гармоник, а наименьший – для гармоники частотой 150 Гц. Для гармоник 3-го, 5-го, 7-го, 19-го, 21-го порядка модели не сформированы из-за слабого влияния принятых к рассмотрению факторов.

На основе полученных моделей имеется возможность прогнозировать показатели качества электроэнергии, например, при проектировании или реконструкции электрифицированных участков. Предположим, что проектируемая тяговая подстанция подключается к системе внешнего электроснабжения с током трехфазного короткого замыкания 3500 А, при этом ожидаемый уровень несимметрии напряжений составляет 2 %.

Согласно данным таблицы можно записать зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от тока тяговой нагрузки:

$$K_U(I_{\text{ЭПС}}) = -0,092 \cdot 2 - 0,000136 \cdot 3500 + 0,000441 \cdot I_{\text{ЭПС}} + 5,432,$$

$$K_U(I_{\text{ЭПС}}) = 0,000441 \cdot I_{\text{ЭПС}} + 4,772.$$

Математические модели для прогнозирования показателей качества электроэнергии

Показатель	Математическая модель	Коэффициент детерминации $R^2$
$K_U$	$K_U = -0,092 \cdot K_{2U} - 0,000136 \cdot I_{к.з} + 0,000441 \cdot I_{\text{ЭПС}} + 5,432$	0,873
$K_{(3)}$	Значимое влияние факторов отсутствует	–
$K_{(5)}$	Значимое влияние факторов отсутствует	–
$K_{(7)}$	Значимое влияние факторов отсутствует	–
$K_{(9)}$	$K_{(9)} = 0,137 \cdot K_{2U} + 0,633$	0,691
$K_{(11)}$	$K_{(11)} = -0,231 \cdot K_{2U} + 4,275$	0,920
$K_{(13)}$	$K_{(13)} = -0,029 \cdot K_{2U} - 0,00008 \cdot I_{к.з} + 0,000192 \cdot I_{\text{ЭПС}} + 2,733$	0,715
$K_{(15)}$	$K_{(15)} = 0,19 \cdot K_{2U} + 0,521$	0,846
$K_{(17)}$	$K_{(17)} = 0,077 \cdot K_{2U} + 0,37$	0,734
$K_{(19)}$	Значимое влияние факторов отсутствует	–
$K_{(21)}$	Значимое влияние факторов отсутствует	–
$K_{(23)}$	$K_{(23)} = -0,053 \cdot K_{2U} - 0,000036 \cdot I_{к.з} + 0,000266 \cdot I_{\text{ЭПС}} + 0,852$	0,607
$K_{(25)}$	$K_{(25)} = -0,154 \cdot K_{2U} + 2,148$	0,761

Согласно ГОСТ 32144–2013 значения  $K_U$  для класса напряжения 6 – 25 кВ не должны превышать 5 % в течение 95 % времени измерений. Тогда можно сделать вывод о том, что при токе нагрузки электровоза свыше 500 А будет наблюдаться превышение допустимого значения  $K_U$ . В этом случае на данной тяговой подстанции необходимо предусмотреть установку средств повышения качества электроэнергии.

Таким образом, в настоящем исследовании выполнен анализ электромагнитных процессов в системе электроснабжения железных дорог постоянного тока путем имитационного моделирования в среде *SimInTech*. Путем многовариантного моделирования выбраны факторы, влияющие на искажение синусоидальности кривой напряжения и тока, и выполнена оценка их значимости методами корреляционного анализа. Установлено, что разница в спектре сетевого тока между электровозами разных типов незначительна. Наиболее важным фактором, влияющим на коэффициент гармонических составляющих тока, является ток тяговой нагрузки. Несимметрия питающих напряжений также оказывает влияние на несинусоидальность сетевого тока, однако в меньшей степени [8].

Выполненные исследования показали, что значительное влияние на качество электрической энергии в системах электроснабжения железных дорог оказывает и мощность системы внешнего электроснабжения (ток трехфазного короткого замыкания). Сформированы математические модели, которые позволяют прогнозировать показатели качества электроэнергии, связанные с несинусоидальностью напряжения.

Предложенный подход к прогнозированию показателей качества электроэнергии является универсальным и может быть применен при проектировании инфраструктуры железных дорог для обеспечения надежного и качественного электроснабжения потребителей.

### Список литературы

1. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. – Москва : Учебно-методический кабинет МПС России, 2002. – 638 с. – Текст : непосредственный.
2. Влияние качества электрической энергии на потери в линиях электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей / Т. В. Ковалева, А. А. Комяков, О. О. Комякова [и др.]. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации устройств электроснабжения электрического транспорта : материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2023. – С. 148–155.

3. Резонансные явления в трехфазных линиях электропередачи, питающих нетяговых потребителей железнодорожного транспорта / Т. В. Ковалева, А. А. Комяков, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2023. – № 3 (78). – С. 109–114. – DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-109-114.

4. Бажанов, С. А. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / С. А. Бажанов, И. С. Батхон, И. А. Баумштейн. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 656 с. – Текст : непосредственный.

5. ГОСТ 839–2019. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 38 с. – Текст : непосредственный.

6. Комяков, А. А. Анализ гармонического состава сетевого тока и напряжения тяговых подстанций постоянного тока при работе электровозов с асинхронными тяговыми двигателями / А. А. Комяков, А. М. Чулембаев. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2023. – С. 608–614. – EDN: QSBKBM.

7. Богданова, К. В. Влияние тяговой нагрузки электрифицированных железных дорог на качество электроэнергии в сетях / К. В. Богданова. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт и технологии : сборник трудов международной научно-практической конференции / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2023. – Том 1. – Выпуск 1 (249). – С. 60–62. – EDN: BSKQOV.

8. Крюков, А. В. Качество электроэнергии в перспективных системах электроснабжения магистральных железных дорог / А. В. Крюков, Д. А. Середкин, И. А. Фесак. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы электроэнергетики : сборник научно-технических статей конференции / Нижегородский гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2021. – С. 206–212. – DOI: 10.46960/44170389\_2021\_206. – EDN: ZMPYUC.

9. Москалев, Ю. В. Снижение несимметрии потребляемых токов тяговыми подстанциями магистральных железных дорог / Ю. В. Москалев. – Текст : непосредственный // Современные проблемы электроэнергетики и пути их решения : материалы всероссийской научно-технической конференции / Дагестанский гос. техн. ун-т. – Махачкала, 2018. – С. 80–83. – EDN: QLQGJJ.

## References

1. Bader M.P. *Electromagnitnaya sovместimost'* [Electromagnetic compatibility]. Moscow, Educational and methodological office of the Ministry of Railways of Russia Publ., 2002. 638 p. (In Russian).

2. Kovaleva T.V., Komyakov A.A., Komyakova O.O. et al. [Influence of electric energy quality on losses in power supply lines of non-traction railway consumers]. *Aktual'nye problemy proektirovaniya i ekspluatatsii ustroystv electrosnabzheniya electriceskogo transporta* [Actual problems of designing and operating electric power supply devices for electric transport]. Omsk, 2023, pp. 148-155 (In Russian).

3. Kovaleva T.V., Komyakov A.A., Komyakova O.O., Pashkova N.V. Resonant phenomena in three-phase power transmission lines feeding non-traction consumers of railway transport. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2023, no. 3 (78), pp. 109-114, DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-109-114 (In Russian).

4. Bazhanov S.A., Batkhon I.S., Baumshtein I.A. *Spravochnik po electriceskim ustanovkam vysokogo napryazheniya* [Handbook of high voltage electrical installations]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981, 656 p. (In Russian).

5. GOST 839-2019. Non-insulated wires for overhead power lines. Moscow, Standardinform Publ., 2019. 38 p. (In Russian).

6. Komyakov A.A., Chulembaev A.M. [Analysis of the harmonic composition of mains current and voltage of DC traction substations during operation of electric locomotives with asynchronous traction motors]. *Innovatsionnye proekty i tehnologii v oobrazovanii, promyshlennosti i na transporte : materialy nauchnoi konferentsii* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport : materials of the scientific conference]. Omsk, 2023, pp. 608-614, EDN: QSBKBM (In Russian).

7. Bogdanova K. V. [Influence of traction load of electrified railways on the quality of electricity in networks] *Zheleznodorozhnyi transport i tehnologii : sbornik trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Railway transport and technologies : proceedings of the international scientific and practical conference]. Yekaterinburg, 2023, vol. 1, no. 1 (249), pp. 60-62, EDN: BSKQOV.

8. Kryukov A.V., Seredkin D.A., Fesak I.A. [The quality of electricity in promising power supply systems of mainline railways]. *Aktual'nye problemy elektroenergetiki : sbornik nauchno-tekhnicheskikh statei konferentsii* [Actual problems of the electric power industry : collection of scientific and technical articles of the conference]. Nizhniy Novgorod, 2021, pp. 206-212, DOI: 10.46960/44170389\_2021\_206, EDN: ZMPYUC (In Russian).

9. Moskalyov Yu.V. [Reduction of asymmetry of consumed currents by traction substations of main railways] *Sovremennye problemy elektroenergetiki i puti ikh resheniia : materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Modern problems of the electric power industry and ways to solve them : materials of the All-Russian scientific and technical conference]. Makhachkala, 2018, pp. 80-83, EDN: QLQGJJ (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Ковалева Татьяна Владимировна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: tatevgeniy@list.ru

### **Комяков Александр Анатольевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7-904-322-89-05.

E-mail: tskom@mail.ru

### **Комякова Ольга Олеговна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: komyakovaoo@mail.ru

### **Пашкова Наталья Викторовна**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: nvp78@mail.ru

### **Чулембаев Аманжол Маратович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7-999-459-74-11.

E-mail: aman4ik-xxx@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Kovaleva Tatiana Vladimirovna**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Theoretical electrical engineering », OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: tatevgeniy@list.ru

### **Komyakov Aleksandr Anatol'evich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor Of Sciences in Engineering, docent, professor of the department «Theoretical electrical engineering», OSTU.

Phone: +7-904-322-89-05.

E-mail: tskom@mail.ru

### **Komyakova Olga Olegovna**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Theoretical electrical engineering », OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: komyakovaoo@mail.ru

### **Pashkova Natalia Viktorovna**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Theoretical electrical engineering », OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: nvp78@mail.ru

### **Chulembaev Amanzhol Maratovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Theoretical electrical engineering », OSTU.

Phone: +7-999-459-74-11.

E-mail: aman4ik-xxx@mail.ru

Прогнозирование показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог / Т. В. Ковалева, А. А. Комяков, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова, А. М. Чулембаев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 3 (59). – С. 96 – 105.

Kovaleva T.V., Komyakov A.A., Komyakova O.O., Pashkova N.V., Chulembaev A.M. Forecasting electricity quality indicators in railway power supply systems. *Journal Of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 3 (59), pp. 96-105 (In Russian).

УДК 621.316

**Н. В. Савина, Ю. В. Мясоедов**

Амурский государственный университет (АмГУ), г. Благовещенск, Российская Федерация

### РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОКА ОБЪЕКТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

**Аннотация.** Энергетический переход 4.0 сопровождается ростом установленной мощности возобновляемых источников энергии в мире. В то же время фотоэлектрические и ветровые установки характеризуются низкой эффективностью. Это обуславливает применение гибридных энергетических активных комплексов, включающих в себя указанные установки. Такие комплексы, в состав которых входят статические преобразователи, являются объектами распределенной генерации, снижающими качество электроэнергии. Цель работы заключается в разработке математического аппарата, описывающего изменения токов объектов распределенной генерации во времени, адекватного условиям функционирования этих объектов и приемлемого при оценке состояния распределительной сети на разных временных интервалах и решения проблемы качества электроэнергии. Распределенная генерация в электрической сети представлена нечетким множеством генераторов гармонических составляющих, параметры режима которых меняются случайным образом во времени. Они распределены в пространстве, так как подключены к разным узлам сети. В работе определена область применения различных типов информационных потоков, сформированных по результатам измерений, для исследования изменения токов объектов распределенной генерации во времени. Предложено математическое описание тока объектов распределенной генерации в виде случайного процесса с нечеткими компонентами. Ток представлен совокупностью первой гармоники, гармонических составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей. Разработан математический аппарат для исследования изменения тока объектов распределенной генерации, основанный на совместном использовании теории случайных процессов, вейвлет-анализа и теории нечетких множеств. Показано применение прямого и обратного вейвлет-преобразования нестационарных случайных процессов, характеризующих изменения тока, описание математического ожидания тока с помощью нечетких множеств, моделирование нестационарной составляющей тока белым и гауссовым шумом. Шум обусловлен особенностями функционирования фотоэлектрических и ветровых установок в составе гибридного энергетического активного комплекса. Приведено дискретное представление тока объекта распределенной генерации. Дискретизация осуществлялась с помощью переменного квантования, а оптимальный интервал дискретизации определен по теореме Котельникова. Представленный математический аппарат может применяться при использовании цифровых технологий в объектах распределенной генерации.

**Ключевые слова:** распределенная генерация, управление, качество электроэнергии, моделирование, неопределенность, стохастичность.

**Natalya V. Savina, Yuriy V. Myasoedov**

Amur State University (AMSU), Blagoveschensk, the Russian Federation

### DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL APPARATUS FOR STUDYING THE CURRENT OF DISTRIBUTED GENERATION OBJECTS

**Abstract.** Energy transition 4.0 is accompanied by an increase in the installed capacity of renewable energy sources in the world. At the same time, photovoltaic and wind installations have low efficiency. Therefore, need using such installations as part of hybrid energy active complexes, called distributed generation facilities. Such complexes, which include static converters, are distributed generation facilities that reduce the quality of electric power. The purpose of the work is to develop a mathematical apparatus describing changes in currents of RG objects over time, adequate to the operating conditions of these objects and acceptable when assessing the state of the distribution network at different time

*intervals and solving the problem of electric power quality. Distributed generation in an electrical network represented by a fuzzy set of generators of harmonic components, the mode parameters of which change randomly over time. They are distributed in space, as they are connected to different network nodes. The work defines the area of application of various types of information flows, formed based on the results of measurements, for studying the change in currents of distributed generation objects over time. A mathematical description of the current of distributed generation objects proposed, in the form of a random process with fuzzy components. The current is represented by a combination of the first harmonic, the harmonic components of the direct, reverse and zero sequences. A mathematical apparatus has been developed for studying changes in the current of distributed generation objects, based on the combined use of the theory of random processes, wavelet analysis and the theory of fuzzy sets. The application of direct and inverse wavelet transform of non-stationary random processes characterizing current changes, description of mathematical expectation of current using fuzzy sets, modeling of non-stationary component of current by white and Gaussian noise are shown. The noise caused by the peculiarities of the functioning of photovoltaic and wind installations as part of a hybrid energy active complex. A discrete representation of the distributed generation object current model shown. Sampling carried out using variable quantization, and the optimal sampling interval determined by Kotelnikov's theorem. The presented mathematical apparatus it can used when using digital technologies in distributed generation facilities.*

**Keywords:** distributed generation, control, power quality, modeling, uncertainty, stochasticity.

В рамках Энергетического перехода 4.0 наблюдается тенденция увеличения доли установленной мощности возобновляемых источников энергии (ВИЭ), при этом скорость роста новых мощностей ВИЭ выше скорости роста мощностей электрических станций, относящихся к централизованной генерации. Как показано в источнике [1], в мире до 75 % новых потребителей будет получать энергию от объектов распределенной энергетики в период до 2030 г. по данным Международного энергетического агентства. В настоящее время применяется несколько определений распределенной генерации (РГ), входящей в распределенную энергетику. Для рассматриваемой темы принято следующее: распределенная генерация – это совокупность объектов генерации с любым типом источников энергии, подключенных к распределительной электрической сети возле потребителя или к сети самого потребителя.

Среди возобновляемых источников энергии наиболее распространены источники, отличающиеся непостоянством выработки электроэнергии. К ним относятся солнечные и ветровые установки или электростанции, однако у них низкий КПД (соответственно 16 – 20 и 40 – 44 % [2]), что обусловлено климатическими условиями: количеством световых часов и скоростью ветра. Перспективным направлением в развитии распределенной генерации является переход на гибридные энергетические активные комплексы, содержащие в своем составе несколько типов источников энергии: например, ветровые и (или) фотоэлектрические установки в сочетании с газотурбинными (парогазовыми или дизельными) установками или с мини- (микро-) ГЭС. Они подключаются к распределительной сети или сети потребителя, т. е. являются объектами РГ. Входящие в их состав ВИЭ, работающие на энергии солнца или ветра, включают в себя силовые статические преобразователи (выпрямители и инверторы). Как известно, силовые преобразователи, применяемые в различных технологических механизмах и устройствах, снижают качество электроэнергии, искажая синусоидальность кривых напряжений и токов. Количественно такое искажение определяется коэффициентом  $n$ -й гармонической составляющей напряжения и суммарным коэффициентом гармонических составляющих напряжения. Как показывает эксплуатационная практика, часто они не удовлетворяют требованиям ГОСТ 32144–2013. Их влияние на качество электроэнергии достаточно хорошо изучено. Влияние ВИЭ, подключаемых к электрической сети с помощью силовых преобразователей, на качество электроэнергии рассмотрено, например, в работах [3, 4]. Гибридные энергетические активные комплексы являются генерацией нового поколения и рассматриваются в составе пилотных проектов в области интеллектуализации электроэнергетики, отсюда статистической базы по их влиянию на качество электроэнергии пока нет, что подтверждает актуальность рассматриваемой темы. Учитывая, что режим работы указанных ВИЭ характеризуется нестабильностью и стохастичностью, то и генерируемый ими спектр гармонических составляющих также стохастичен и нестабилен. Следовательно, такие объекты можно рассматривать как источники снижения качества электроэнергии, у которых

случайным образом меняются как спектр гармонических составляющих, так и их амплитуда. Для оценки их влияния на качество электроэнергии необходимо математическое описание токов объектов РГ, позволяющее изучать изменение во времени не только основной, но и высших гармонических составляющих.

В соответствии с концепцией интеллектуальной электроэнергетики [2, 5] объекты РГ подключаются в разных точках распределительных электрических сетей, т. е. рассредоточены по сети. Для них применимы как изолированные режимы работы, так и параллельная работа с электроэнергетической системой (ЭЭС). Мощность, выдаваемая объектами РГ, зависит от внешних факторов, в том числе климатических, ее величина случайна в любой момент времени. Для электрической сети объекты РГ представляют собой множество генераторов гармонических составляющих, значения которых меняются во времени и в пространстве случайным образом. Такое множество является нечетким, что обусловлено особенностями функционирования солнечных и ветровых установок, входящих в состав гибридных энергетических активных комплексов. Появление дополнительных источников, влияющих на качество электроэнергии, приводит к его ухудшению в распределительных сетях.

Для гибридных энергетических активных комплексов применение цифровых технологий обеспечит оптимальный режим работы с высоким уровнем надежности. Следовательно, методы моделирования электроэнергетических режимов таких объектов должны быть применимы при цифровом управлении.

Все рассмотренные особенности функционирования объектов РГ не учитываются в традиционных методах моделирования режимов электрических сетей и определения показателей качества электроэнергии. В настоящее время отсутствуют методы моделирования режимов гибридных энергетических активных комплексов, адекватные гибкости и управляемости интеллектуальных распределительных сетей, к которым они подключаются. Для их разработки нужен математический аппарат, позволяющий учесть эти особенности и исследовать изменения параметров режима на разных временных интервалах.

Цель данной работы заключается в разработке математического аппарата, описывающего изменения токов объектов РГ во времени, адекватного условиям функционирования этих объектов и приемлемого при оценке состояния распределительной сети на разных временных интервалах и решения проблемы качества электроэнергии.

Объектом РГ в этой работе принят гибридный энергетический активный комплекс.

**Математическое описание процесса изменения тока в узле подключения объекта РГ к распределительной сети.** Качество управления режимами распределительной электрической сети, включающей в себя объекты РГ, во многом определяется выбранными методами моделирования исходной режимной информации. Учитывая, что объекты РГ снижают качество электроэнергии, такие модели должны быть применимы и для решения проблемы качества электроэнергии. Следовательно, они должны раскрывать закономерности изменения режима объектов РГ, рассматривая их не только как источники генерации электроэнергии, но и как совокупность источников, снижающих ее качество, число и режим работы которых в рассматриваемый период времени является случайным и неопределенным. Разработка математического аппарата показана для исследования тока в узле сети с объектом РГ.

Исходной информацией для разрабатываемого математического аппарата, описывающего процесс изменения тока в узле подключения объекта РГ к распределительной сети (тока объекта РГ) является текущая и ретроспективная база данных, получаемая в результате измерения мгновенных значений тока в точке подключения объекта РГ к распределительной сети, т. е. узлового тока, представляющего собой суммарный ток, генерируемый всеми источниками гибридного энергетического активного комплекса в рассматриваемый момент времени. Такая информация может быть получена традиционными способами сбора информации, принятыми в электрических сетях, или в соответствии со стандартом МЭК 61850. При этом качество исходной информации будет разным.

При описании изменения тока распределенная генерация должна рассматриваться как нечеткое множество подключаемых к распределительной электрической сети установок РГ с постоянно меняющимися параметрами режима, которые генерируют в сеть гармонические составляющие тока и потребляют гармонические составляющие токов от других объектов РГ и специфичных потребителей, подключенных к сети с РГ.

Величина тока, генерируемого объектами РГ, определяется не только спросом, но и в значительной степени климатическими характеристиками, такими как интенсивность солнечного света и угол падения солнечных лучей, скоростной напор ветра и его направление, температура и т. п. Она зависит также от реализуемого режима работы: параллельная работа с ЭЭС, островной режим, изолированная работа, реализация которых показана в монографии [6]. В общем случае, рассматривая такие объекты и как генераторы, и как рецепторы, необходимо при математическом описании тока учитывать качество информационного потока. В соответствии с работой [7] различают детерминированную, вероятностную, нечеткую и интервальную информацию.

Детерминированное представление информации о состоянии источников объектов РГ описывается дискретным рядом количества подключенных к сети фотоэлектрических, ветровых и иных установок, а также их совокупностью. При этом рассматриваются множества каждого вида источников энергии гибридного энергетического активного комплекса, т. е. фотоэлектрических, ветровых установок и т. д. Как правило, такая детерминированная информация выражается количеством подключенных источников каждого типа и их номинальным током. Ток объекта РГ определяется суммой токов его источников, работающих в рассматриваемый момент времени, или долей суммарного тока работающих генерирующих установок в составе объекта РГ в рассматриваемый момент времени, генерируемой в сеть электроэнергетической системы. Эта доля определяется по соотношению распределения тока между потребителями и ЭЭС. Детерминированное описание информации о режимах работы объектов РГ не учитывает ее стохастичности. Но этот способ может быть применен для определения структуры генерации в узлах сети в рассматриваемый период времени, что позволяет соотносить изменения токов со структурой объектов РГ.

Физическую природу генерируемых в сеть токов от объектов РГ отражает вероятностное представление информации об электроэнергетическом режиме в виде случайного процесса. Математическое представление изменения тока в точке подключения объекта РГ к распределительной сети случайным процессом позволит найти закономерности его изменения, по которым, зная характеристики случайного процесса в текущий и ретроспективный периоды времени, можно выполнить прогноз на интересующий интервал упреждения. Ток рассматривается как совокупность всех гармонических составляющих, включая первую. При математическом описании тока необходимо учитывать нечеткость состава генерирующих установок объектов РГ. Эта нечеткость обусловлена принципом работы гибридного энергетического активного комплекса и климатическими характеристиками. В таком комплексе автоматически выбирается тот состав генерирующих установок, который обеспечит оптимальную выдачу электрической энергии в сеть с учетом ограничений по пороговой солнечной интенсивности и скорости ветра. В этом случае подойдет совместное применение теории случайных процессов и теории нечетких множеств.

Интервальное представление информационного потока целесообразно для разработки алгоритма управления объектом РГ в части определения уставки для автоматического переключения от одной совокупности генерирующих установок объектов РГ к другой. Оно осуществляется путем интервального анализа, где интервальная неопределенность обусловлена структурой генерирующих установок объектов РГ, участвующих в выдаче мощности в рассматриваемый период времени. Неопределенность раскрывается вероятностными интервалами.

Разное качество исходной информации о режиме и особенности функционирования объектов РГ полагает применение совокупности методов для описания изменения тока

объекта РГ. Исходя из полноты и достоверности исходной информации в математическом описании изменения тока должны быть учтены стохастический характер генерируемого в сеть тока, нечеткость состава генерирующих установок каждого объекта РГ и неопределенность генерируемого значения тока в сеть от каждого объекта РГ.

Представляя ток объекта РГ в узле его подключения нестационарным случайным процессом с нечеткими компонентами, в соответствии с работой [7] можно получить его математическое описание, которое отражает все особенности функционирования объектов РГ, подключенных к распределительной сети.

Это математическое описание представлено в виде:

$$I(t) = \bar{I}(t) + I_s(t) + \xi(t), \quad (1)$$

где  $\bar{I}(t)$  – изменение математического ожидания тока объекта РГ во времени;

$I_s(t)$  – стационарный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием;

$\xi(t)$  – нестационарная составляющая случайного процесса.

Здесь ток  $I(t)$  представляется совокупностью первой и высших гармонических составляющих.

Стационарный случайный процесс не меняется на различных интервалах времени, что используется при прогнозировании.

При применении выражения (1) для прогнозирования целесообразно использовать следующую его модификацию:

$$I(t) = I_s(t) + A_t [I(t) + \xi(t)], \quad (2)$$

где  $A_t$  – оператор преобразования случайного процесса по времени. В соответствии с теорией случайных процессов он выражается в виде:

$$A_t = L + N; \quad L \cdot N = \varphi,$$

где  $L$  – подмножество линейных операторов;

$N$  – подмножество нелинейных операторов.

В этом случае процесс изменения тока рассматривается как система. В ней входными параметрами являются текущие реализации тока объекта РГ, а выходными – реализации тока в ретроспективный или в прогнозируемый период. Оператор  $A_t$  выбирается в зависимости от качества исходной информации и выбранного метода преобразования случайного процесса, например, вейвлет-преобразования. С его помощью выделяется из общего случайного процесса его стационарная составляющая. Такой подход обусловлен тем, что корреляционная функция стационарного процесса не зависит от сдвига времени. Тогда, определяя корреляционную функцию стационарной составляющей случайного процесса по реализациям в ретроспективный период, можно точно предсказать поведение процесса в будущем. Для проверки достоверности модели входными являются ретроспективные реализации, а выходными – текущие реализации. Разность между измеренной и смоделированной текущей реализацией должна быть меньше заданной погрешности.

При включении объекта РГ в сеть, где присутствует несимметрия напряжений, в математическом описании тока следует учесть гармонические составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей, что обусловлено двумя свойствами качества электроэнергии: несинусоидальностью кривой напряжения и несимметрией напряжений. В этом случае целесообразно использовать каноническое разложение, традиционно применяемое при моделировании случайного процесса. Тогда ток прямой, обратной и нулевой последовательностей раскладывается по частотам основной и высших гармоник, и каждая из них представляется тремя некоррелированными компонентами: математическим ожиданием,

стационарным случайным процессом с нулевым математическим ожиданием и нестационарной составляющей. Затем осуществляется разложение каждой гармоники на временные периодические составляющие с периодом  $t_m$ . Нечеткость состава генерирующих установок объекта РГ определяется климатическими условиями в рассматриваемый временной период, обуславливающими выбор того или иного ВИЭ спросом на электроэнергию. Для описания нечеткости состава генерирующих установок целесообразно использовать теорию нечетких множеств применительно к математическому ожиданию, выражая его регрессионной моделью с нечеткими коэффициентами. Нестационарная случайная составляющая представляет собой помеху.

Таким образом, отличительной особенностью предложенного подхода является разложение кривой тока на временные периодические составляющие с периодом  $t_m$  и гармонические составляющие с частотой  $\omega_n$ , включая первую, в совокупном применении теории случайных процессов и теории нечетких множеств.

Исходя из сказанного выше выражение (1) можно преобразовать к виду:

$$I(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^K \tilde{a}_i M_i[I_n(t)] + \sum_{m=1}^M \left( \sum_{n=1}^N I_{mn} \cos(\omega_{mn}t + \varphi_{mn}) + \sum_{n=2}^N I_{2mn} \cos(\omega_{2mn}t + \varphi_{2mn}) + \sum_{n=2}^N I_{0mn} \cos(\omega_{0mn}t + \varphi_{0mn}) \right) + \xi(t), \quad (3)$$

где  $\tilde{a}_i$  – нечеткие коэффициенты регрессионной модели, описывающей математическое ожидание  $n$ -й гармонической составляющей тока объекта РГ;

$M_i[I_n(t)]$  – математическое ожидание  $i$ -го фактора амплитудного значения тока  $n$ -й гармоники объекта РГ, включая первую;

$K$  – число факторов регрессионной модели;

$N$  – число учитываемых частотных гармонических составляющих;

$I_{mn}, \omega_{mn}, \varphi_{mn}$  – амплитуда, круговая частота, фазовый сдвиг  $m$ -й периодической составляющей по времени  $n$ -й гармонической составляющей тока объекта РГ прямой последовательности, включая первую;

$I_{2mn}, \omega_{2mn}, \varphi_{2mn}, I_{0mn}, \omega_{0mn}, \varphi_{0mn}$  – амплитуда, круговая частота, фазовый сдвиг  $m$ -й периодической составляющей по времени  $n$ -й гармонической составляющей тока объекта РГ обратной или нулевой последовательностей;

$m$  – номер временной гармонической составляющей тока объекта РГ;

$n$  – номер частотной гармонической составляющей тока объекта РГ, включая интергармоники;

$M$  – число учитываемых гармонических составляющих по времени.

Как видно из выражения (3), математическое представление процесса изменения тока объекта РГ состоит из следующих некоррелированных компонентов: регрессионной модели, описывающей изменение математического ожидания тока во времени при его разложении на гармонические составляющие по частоте, канонического представления стационарного случайного процесса с математическим ожиданием, равным нулю, периодическими временными и гармоническими частотными составляющими тока прямой, обратной и нулевой последовательностей и нестационарной составляющей случайного процесса.

Областью применения полученного математического описания тока является исследование качества электрической энергии в электрической сети с распределенной генерацией и принятие решения по выбору схемно-режимных мероприятий и технических средств для его улучшения.

## Математический аппарат для исследования изменения тока объекта РГ во времени.

Выбор математического аппарата для исследования тока объекта РГ осуществляется исходя из качества исходной информации и цели дальнейшего использования математического описания процесса изменения тока. В общем случае он включает в себя сочетание корреляционного анализа, вейвлет-анализа, теории нечетких множеств.

Корреляционный анализ применяется для выявления стационарности и эргодичности случайного процесса. При этом корреляционная функция случайного процесса, описывающего изменение тока, представляется в виде суммы корреляционных функций стационарного процесса и нестационарной составляющей, которая представляет собой быстро меняющуюся компоненту, включающую случайные флуктуации тока, формирующиеся под воздействием множества факторов, рассмотренных выше.

Применение вейвлет-преобразования в сочетании с теорией нечетких множеств позволит сократить объем исследуемого случайного процесса изменения тока объекта РГ и обеспечить требуемую точность моделирования на разных временных интервалах, выявить закономерность изменения во времени не только основной, но и высших гармонических составляющих.

Вейвлет-преобразование применяется для описания процесса изменения тока, представляющего собой совокупность основной и высших гармонических составляющих одновременно во временной и частотной областях, что отражает его сущность. Временной образ описывается функцией времени  $\psi(t)$ , а частотный – Фурье-образом этой функции  $\bar{\psi}(\omega) = F(\omega)$ , определяющим огибающую спектра вейвлета.

Формула, описывающая Фурье-образ, имеет вид [8]:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{\psi}(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (4)$$

В нашем случае функция  $\psi(t)$  представляет собой изменение тока объекта РГ во времени. Она выражается своим набором вейвлетов для разных временных интервалов и корректируется множителями в виде временных функций.

Для разложения исследуемого процесса используются прямое вейвлет-преобразование, осуществляемое путем вычислений вейвлет-коэффициентов (коэффициентов разложения), анализ полученных коэффициентов и обратное вейвлет-преобразование для реконструкции процесса по полученным коэффициентам вейвлет-разложения с помощью пакета расширения Wavelet Toolbox в MATLAB. Для ускорения процесса вычислений можно использовать алгоритм быстрого вейвлет-преобразования, в котором также есть вейвлет-фильтры, позволяющие очищать процесс от шума, описывающего нестационарную составляющую процесса, что повышает точность прогнозирования. Очистка от шума нужна для выделения стационарного случайного процесса из моделируемого с целью получения точного прогноза.

Реконструкция тока объекта РГ по коэффициентам вейвлет-преобразования и базису вейвлетов осуществляется в соответствии с алгоритмом вейвлет-анализа, представленным в работе [8], на основе выражения

$$I(t) = \frac{I}{\|\Psi_{xa}(t)\|} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{a^2} W_I(x, a) \Psi_{xa}(t) da dx, \quad (5)$$

где  $a = \frac{1}{f_n}$  – переменная, обратная частоте гармонических составляющих  $f_n$ ;

$x$  – аналог координаты времени, переменная по времени  $t$ , показывающая изменение тока объекта РГ во времени. Она может рассматриваться также как координатная переменная для описания расположения объекта РГ в пространстве;

$\|\Psi_{xa}(t)\|$  – норма функции вейвлета  $\Psi_{xa}(t)$ ;

$\Psi_{xa}(t)$  – вейвлет, тип которого выбирается в зависимости от структуры объекта РГ;

$W_i(x, a)$  – вейвлет-преобразование.

На различных временных интервалах тип вейвлета может меняться, в этом случае применяется пакет вейвлетов.

Нечеткое задание математического ожидания тока осуществляется множественной регрессионной моделью с нечеткими коэффициентами, как показано в формуле (3). Их можно определить с помощью известных методов теории нечетких множеств, реализуемых в средах MATLAB и fuzzy TECH [9]. Прогноз математического ожидания тока объекта РГ осуществляется с помощью корреляционного анализа и функций принадлежности, определяемых в соответствии с методами теории нечетких множеств.

Нестационарная составляющая процесса представлена случайной помехой, описываемой шумом.

### **Порядок применения математического аппарата для исследования тока объекта РГ.**

Так как математическое описание изменения тока объекта РГ включает в себя три некоррелированных составляющих: математическое ожидание, стационарный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и шум, то для описания каждой из них выбирается свой набор методов, отражающих их сущность. Отсюда анализ и синтез процесса изменения тока объекта РГ во времени состоит из трех этапов и выполняется в следующем порядке: выделение из случайного процесса стационарной составляющей, представление математического ожидания нечеткими множествами, моделирование нестационарной составляющей случайного процесса шумом.

Применение выбранного математического аппарата осуществляется в следующий последовательности.

1. Определяются характеристики случайного процесса изменения тока объекта РГ: математическое ожидание, корреляционная функция, нормированная корреляционная функция по текущей и ретроспективным реализациям. В качестве исходной информации используются результаты измерений тока объекта РГ в указанные временные периоды.

2. Проводится корреляционный анализ и по виду корреляционной функции определяется тип случайного процесса: стационарный или нестационарный, проверяется, есть ли у него свойство эргодичности. Если случайный процесс обладает свойствами стационарности и эргодичности, то определяется спектральная плотность с помощью преобразования Фурье, выбирается фильтр, определяются его характеристики, осуществляется прогноз спектральной плотности путем пропускания ее через частотную характеристику и восстанавливается процесс по спектру с помощью быстрого преобразования Фурье. Таким образом, используя стандартные процедуры теории случайных процессов, реализуемые в системе MATLAB, определяется состояние стационарного случайного процесса в будущем с заданным интервалом упреждения, т. е. его прогноз.

3. Для нестационарного случайного процесса выбирается наиболее эффективный тип вейвлета или пакет вейвлетов в зависимости от вида корреляционной функции. Выбирается тот вейвлет или пакет вейвлетов, который дает наилучшее приближение реконструируемого процесса к исходному на основе сравнения коэффициентов разложения. Как показал анализ, целесообразно применять вейвлеты «мексиканская шляпа», Добеши, Морле. При выборе вейвлета из системы MATLAB его первообразная находится с помощью команды `intwave`.

4. В среде MATLAB проводится вейвлет-анализ быстрым прямым вейвлет-преобразованием для разложения исходного графика тока с помощью выбранных вейвлетов, представленных в виде волновых пакетов с нулевым значением интеграла, локализованных во времени и имеющих ограниченный частотный спектр. Для этого выбираются значения переменных  $a$  (масштабный коэффициент) и  $x$  (параметр смещения), по которым определяются вейвлет-коэффициенты случайного процесса. Обратное вейвлет-преобразование осуществляется с помощью коэффициентов разложения и используется для

восстановления процесса и идентификации модели. Проводится анализ коэффициентов разложения и с помощью формулы обращения определяется ток:

$$I(t) = C_{\Psi}^{-1} \iint_{R^2} W_i(x, a) \Psi\left(\frac{t-x}{a}\right) \sqrt{a^{-1}} \frac{dadx}{a^2}, \quad (6)$$

где  $C_{\Psi} = 2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} |\omega|^{-1} |\hat{\Psi}(\omega)|^2 d\omega$  вычисляется по вейвлету  $\Psi(t)$ .

Подробный алгоритм вейвлет-преобразований приведен, например, в работе [8] и является известным.

Применением быстрых прямого и обратного вейвлет-преобразования проводится идентификация модели.

5. Выбирается фильтр и определяются его характеристики с помощью стандартных процедур вейвлет-анализа. Путем фильтрации исследуемого процесса, описывающего изменение тока во времени, выделяется стационарный эргодический процесс. Остаточная составляющая является шумом.

6. Осуществляется прогнозирование процесса на заданный интервал упреждения, т. е. расширение процесса с помощью пакета вейвлет-преобразований в системе MATLAB.

7. При нечетком задании информации о подключаемых генерирующих установках объекта РГ к электрической сети в рассматриваемый период времени выполняется нечеткое регрессионное моделирование для описания изменения математического ожидания  $n$ -й гармонической составляющей тока, включая первую:

$$M[I_n(t)] = \sum_1^K \tilde{a}_i I_{in}(t). \quad (7)$$

Нечеткие коэффициенты регрессионной модели определяются в среде fuzzy TЕСH для выбранных сечений случайного процесса тока  $n$ -й гармоники по текущей и ретроспективным реализациям случайного процесса.

8. Выполняется прогнозирование математического ожидания тока. При этом математическое ожидание тока каждой гармоники в момент времени  $t_i$  представляется в виде:

$$M[I_n(t_i)] = \int_{-\infty}^{+\infty} I_n(t_i) \mu(I) dI, \quad (8)$$

где  $\mu(I)$  – функция принадлежности.

Для прогноза вначале формируются ретроспективное и текущее множества случайного процесса тока каждой гармоники и определяются их нормированные корреляционные функции. Затем рассчитываются функции принадлежности  $n$ -й гармоники  $\mu(I_j(t))$  для каждого из множеств в пакете расширения Fuzzy Logic Toolbox MATLAB [9]. Определяются обобщенные относительные расстояния Хемминга по выражению

$$d(I_j^P, I_j^T) = |\mu(I_j^P(t)) - \mu(I_j^T(t))|, \quad (9)$$

где  $\mu(I_j^P(t))$ ,  $\mu(I_j^T(t))$  – соответственно функция принадлежности  $n$ -й гармоники ретроспективного и текущего множеств.

Определяется значение  $d$  для  $i$ -го момента времени по формуле

$$d[\mu(I_p(t)), \mu(I_m(t))] = \max[\mu(I_m(t)), \mu(I_p(t))] - \min[\mu(I_m(t)), \mu(I_p(t))]. \quad (10)$$

Формируется прогнозируемое множество путем выбора значений из ретроспективного или текущего множества следующим образом. Если  $d[\mu(I_p(t)), \mu(I_m(t))] < 0,5$ , в прогнозируемое множество принимается значение из ретроспективного множества, в

противном случае – из текущего множества. Для найденного прогнозируемого множества применяется регрессионная модель (7), тем самым определяется прогнозируемое значение математического ожидания тока при нечетком представлении структуры генерирующих источников, входящих в состав объекта РГ, в рассматриваемый временной период.

Для определения математического ожидания суммарного тока в момент времени  $t_i$  суммируются математические ожидания всех генерируемых гармонических составляющих, включая первую, объектом РГ, соответствующие моменту времени  $t_i$ .

9. В случайном процессе, описывающем ток, может присутствовать нестационарная составляющая  $\xi(t)$ . Она представляет собой шум. Предлагается использовать два вида шума: белый шум и гауссов шум. Белый шум целесообразно применять при моделировании тока первой гармоники либо тока одного из ВИЭ, входящих в состав гибридного энергетического комплекса, так как это случайный некоррелированный процесс с равномерным энергетическим спектром, его мощность не зависит от частоты, а корреляционная функция представляет собой  $\delta$ -функцию Дирака [10].

Плотность вероятности гауссова шума определяется общеизвестным выражением

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (11)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение шума;

$m$  – математическое ожидание шума.

Независимо от вида случайного процесса сумма произвольных случайных процессов при возрастании количества слагаемых стремится к гауссову процессу, что следует из центральной теоремы. При этом сходимость настолько быстра, что при числе слагаемых пять или шесть результирующий процесс очень близок к гауссову. Учитывая, что ток каждого источника объекта РГ является случайным процессом и таких источников в сети – не менее указанных слагаемых, выбор гауссова шума для описания нестационарной составляющей модели (3) обоснован.

Таким образом, предложенное математическое описание изменения тока объекта РГ и выбранный инструментарий для его исследования позволяют раскрыть все особенности функционирования объектов РГ, подключенных к распределительной сети.

В качестве примера показан процесс выделения стационарной составляющей случайного процесса, характеризующего изменение тока основной гармоники во времени, для иллюстрации целесообразности применения вейвлет-преобразования при описании изменения токов объектов РГ. Моделировался объект РГ, включенный в сеть 10 кВ, при генерации электроэнергии ветроэлектрической установкой. Случайный процесс в рассматриваемый временной период представлен на рисунке 1.

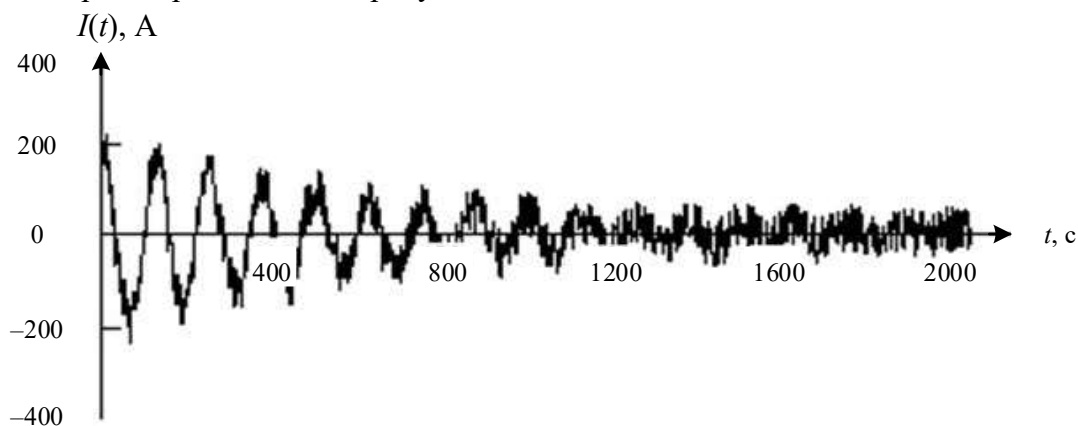


Рисунок 1 – Случайный процесс изменения тока, генерируемого объектом РГ

Коэффициенты масштабирования, полученные при прямом вейвлет-преобразовании, показаны на рисунке 2.

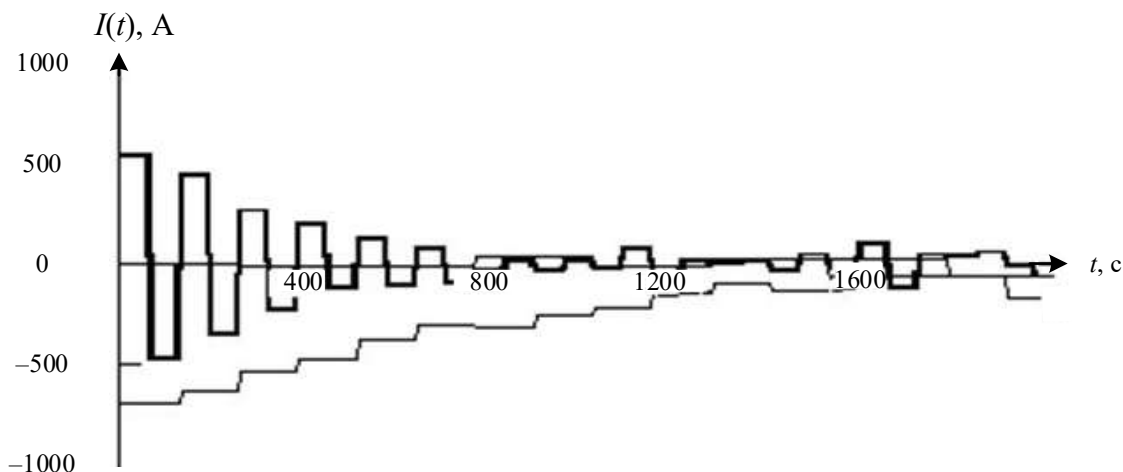


Рисунок 2 – Коэффициенты масштабирования

Восстановление (реконструкция) процесса с очисткой от шума с помощью обратного преобразования и фильтрации приведено на рисунке 3.

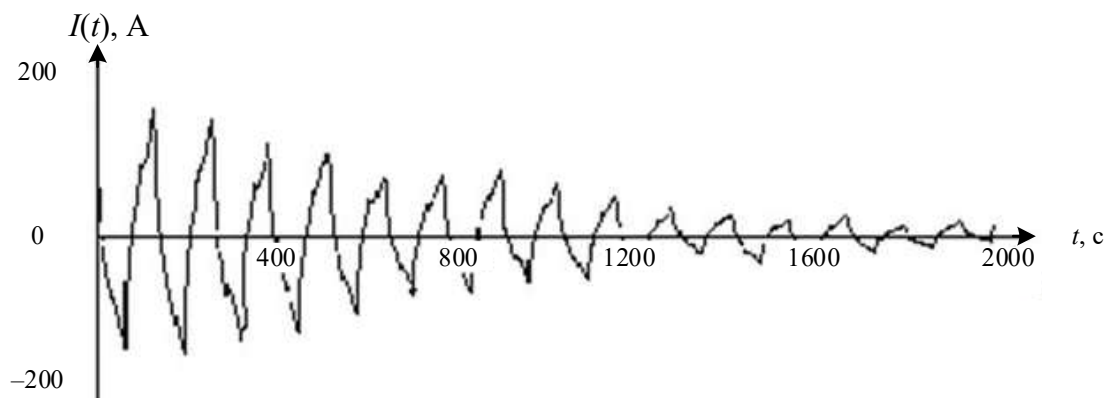


Рисунок 3 – Обратное вейвлет-преобразование

Как видно из рисунков 1, 3, закономерность изменения тока сохранилась, а случайный процесс очищен от шума, что позволяет получать более точный прогноз при работе с нестационарными процессами, описывающими токи объектов РГ.

Детальные исследования токов гибридных энергетических активных комплексов с помощью предложенного математического аппарата выходят за рамки данной статьи.

Предложенный математический аппарат может служить основой для моделирования режимов электрической сети, включающей в себя объекты РГ, и для исследования качества электроэнергии в таких сетях.

**Дискретная форма представления тока объекта РГ.** Одним из направлений в моделировании объектов РГ является представление параметров режима в дискретной форме. Такой подход целесообразен при применении цифровых технологий на объекте РГ и может быть использован как один из элементов при разработке их цифровых двойников. Покажем его на примере тока объекта РГ.

Случайный процесс изменения тока в непрерывной форме заменяется дискретной последовательностью его временных реализаций с переменным временным интервалом  $\Delta t$ , который определяется величиной дискретизации по теореме Котельникова [11, 12]. Это позволяет получить последовательность дискретных значений, обеспечивающую требуемую

точность моделирования при потере информации. Как известно, дискретизация непрерывного случайного процесса всегда ведет к потере информации.

Ток каждой гармонической составляющей в исследуемый период времени (текущий, ретроспективный) представляется в виде

$$I_{kn}(t) = P_n(t_k) \Delta \sigma_n(t - t_k), \quad (12)$$

где  $I_{kn}(t)$  – дискретное значение тока  $n$ -й гармоники;

$P_n(t_k)$  – число дискретных значений (квантов)  $n$ -й гармоники;

$\Delta \sigma_n(t - t_k)$  – единичная функция для  $n$ -й гармоники.

Дискретное представление тока объекта РГ в соответствии с формулой Котельникова имеет вид:

$$I(t) = \sum_k \frac{\sin \pi(t - k)}{\pi(t - k)} I_k, \quad (13)$$

Корреляционная функция тока, используемая для прогнозирования, определяется так:

$$R(t) = \sum_k \frac{\sin \pi(t - k)}{\pi(t - k)} R_k. \quad (14)$$

Для второго направления в описании токов объектов РГ приведен только общий подход с выделением корреляционной функции для дальнейшего прогнозирования.

В работе показано, что объекты распределенной генерации, в состав которой входят гибридные энергетические активные комплексы, помимо гармоники основной частоты генерируют гармонические составляющие тока, обладающие стохастичностью и неопределенностью их поведения во времени. Структура генерирующих установок объекта РГ при функционировании в электрической сети представлена нечетким множеством.

Для исследования объектов РГ выделены следующие виды представления информации: детерминированная, вероятностная, нечеткая и интервальная. Показана область применения для каждой из них.

Разработка математического аппарата, учитывающего особенности функционирования объектов РГ и описывающего изменение параметров режима во времени, показана на примере тока в узле подключения объекта РГ к электрической сети. Предложено математическое описание изменения тока объектов РГ, представляющее собой нестационарный случайный процесс с нечеткими компонентами. Оно состоит из трех некоррелированных составляющих: математического ожидания, стационарного случайного процесса с нулевым математическим ожиданием и шума.

Предложен математический аппарат для исследования изменения тока объектов РГ, включающий в себя помимо первой гармонические составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей. Он базируется на совместном применении теории случайных процессов, вейвлет-анализа и теории нечетких множеств в среде MATLAB.

Приведено математическое описание дискретной формы представления тока объекта РГ для дальнейшей разработки при применении цифровых технологий в гибридных энергетических активных комплексах.

## Список литературы

1. Распределенная энергетика в России: потенциал развития / А. Хохлов, Ю. Мельников [и др.]. // Энергетический центр Московской школы управления Сколково. – Текст : электронный. – URL.: [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_DER-3.0\\_2018.02.01.pdf](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf)/ (дата обращения: 14.07.2024).

2. Бухгольц, Б. М. Smart Grids – основы и технологии энергосистем будущего / Б. М. Бухгольц, З. А. Стычински; под общ. ред. Н. И. Воропая. – Москва : МЭИ, 2017. – 461 с. – Текст : непосредственный.
3. Бекиров, Э. А. Анализ качества электрической энергии, генерируемой солнечной электростанцией в энергосистему / Э. А. Бекиров, И. В. Романовский, С. И. Колобов. – Текст : непосредственный // Строительство и техногенная безопасность. – 2011. – № 40. – С. 106–115.
4. Дворкин, Д. В. Средства и способы снижения влияния ВИЭ на снижение качества электроэнергии и надежности электроснабжения при переходе к зеленой энергетике / Д. В. Дворкин, Д. А. Халезин. – Текст : непосредственный // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 1 (76). – С. 62–68.
5. Концепция национального проекта «Интеллектуальная энергетическая система России». Минэнерго России // <http://government.ru> : сайт. – Текст : электронный. – URL: [http://static.government.ru/media/files/LqKPTwOrMkzgzHm8alKBP5bOh70wHZq6P.pdf/](http://static.government.ru/media/files/LqKPTwOrMkzgzHm8alKBP5bOh70wHZq6P.pdf) (дата обращения: 14.07.2024).
6. Гуревич, Ю. Е. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией : монография / Ю. Е. Гуревич, П. В. Илюшин. – Нижний Новгород : Нижегородский институт управления – филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, 2018. – 280 с. – Текст : непосредственный.
7. Савина, Н. В. Системный анализ потерь электроэнергии в электрических распределительных сетях / Н. В. Савина. – Новосибирск : Наука, 2008. – 228 с. – Текст : непосредственный.
8. Смоленцев, Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н. К. Смоленцев. – Москва : ДНК Пресс, 2019. – 560 с. – Текст : непосредственный.
9. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в средах MATLAB и fuzzy TECH / А. В. Леоненков. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2010. – 736 с. – Текст : непосредственный.
10. Бендат, Дж. Применение корреляционного и спектрального анализа [пер. с англ.] / Дж. Бендат, А. Пирсол. – Москва : Мир, 1983. – 312 с. – Текст : непосредственный.
11. Нефедов, В. И. Основы радиоэлектроники и связи / В. И. Нефедов, А. С. Сигов. – Москва : Высшая школа, 2009. – 735 с. – Текст : непосредственный.
12. Козякин, В. С. Теорема Котельникова – основа цифрового оценивания и моделирования непрерывных процессов / В. С. Козякин, Н. А. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Радиотехника. – 2008. – № 8. – С. 8–14.

## References

1. Hohlov A., Mel'nikov Yu., Veselov F., Holkin D., Dacko D. *Raspredelelnaia energetika v Rossii: potentsial razvitiia* [Distributed energy in Russia: development potential]. Available at: [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_DER-3.0\\_2018.02.01.pdf/](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf) (accessed 14.07.2024).
2. Buhgol'c B.M., Stychinski Z.A. *Smart Grids – osnovy i tehnologii jenergosistem budushhego* [Smart Grids – fundamentals and technologies of future energy systems]. Moscow, Moscow Power Engineering Institute Publ., 2017, 461 p. (In Russian).
3. Bekirov E.A., Romanovskii I.V., Kolobov S.I. Analysis of the quality of electric energy generated by a solar power plant in the energy system. *Stroitel'stvo i tekhnogennaia bezopasnost' – Construction and technogenic safety*, 2011, no. 40, pp. 106-115 (In Russian).
4. Dvorkin D.V., Halezin D.A. Means and methods of reducing the impact of renewable energy sources on reducing the quality of electricity and reliability of power supply during the transition to green energy. *Elektroenergiia. Peredacha i raspredelenie – Electric energy. Transmission and distribution*, 2023, no. 1 (76), pp. 62-68 (In Russian).

5. *Kontsepsiia natsional'nogo proekta «Intellektual'naia energeticheskaia sistema Rossii»*. *Minenergo Rossii* [The concept of the national project «Intelligent Energy System of Russia». The Ministry of Energy of Russia]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/LqKPTwOrMkzgHm8alKBP5bOh70wHZq6P.pdf/> (accessed: 14.07.2024).
6. Gurevich Yu.E., Ilyushin P.V. *Osobennosti raschetov rezhimov v energoraionakh s raspredelennoi generatsiei : monografiia* [Features of mode calculations in energy districts with distributed generation : monograph]. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod Institute of Management Publ., 2018, 280 p. (In Russian).
7. Savina N.V. *Sistemnyi analiz poter' elektroenergii v elektricheskikh raspredelitel'nykh setiakh* [System analysis of electricity losses in electrical distribution networks]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2008, 228 p. (In Russian).
8. Smolencev N.K. *Osnovy teorii veivletov. Veivlety v MATLAB* [Fundamentals of wavelet theory. Wavelets in MATLAB]. Moscow, DNK Press Publ., 2019, 560 p. (In Russian).
9. Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovanie v sredah MATLAB i fuzzy TECH* [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzy TECH]. Saint Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2010, 736 p. (In Russian).
10. Bendat Dzh., Pearsol A. *Primenenie korrelyatsionnogo i spektral'nogo analiza* [Application of correlation and spectral analysis]. Moscow, Mir Publ., 1983, 312 p. (In Russian).
11. Nefedov V.I., Sigov A.S. *Osnovy radioelektroniki i svyazi* [Fundamentals of radio electronics and communications]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 2009, 735 p. (In Russian).
12. Koziakin V.S., Kuznetsov N.A. Kotelnikov's theorem – the basis for digital assessment and modeling of continuous processes. *Radiotekhnika – Radio engineering*, 2008, no. 8, pp. 8-14 (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Савина Наталья Викторовна

Амурский государственный университет (АмГУ).

Игнатьевское шоссе, д. 21, г. Благовещенск, 675027, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой энергетики, АмГУ.

Тел.: +7 (4162) 234-726.

E-mail: nataly-savina@mail.ru

### Мясоедов Юрий Викторович

Амурский государственный университет (АмГУ).

Игнатьевское шоссе, д. 21, г. Благовещенск, 675027, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, декан энергетического факультета, АмГУ.

Тел.: +7(4162) 234-730.

E-mail: myv@amursu.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Савина, Н. В. Разработка математического аппарата для исследования тока объектов распределенной генерации / Н. В. Савина, Ю. В. Мясоедов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 3 (59). – С. 105 – 118.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Savina Natalya Viktorovna

Amur State University (AMSU).

21, Ignatievskoe highway, Blagoveschensk, 675027, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, head of the department of Energy, AMSU.

Phone: +7 (4162) 234-726.

E-mail: nataly-savina@mail.ru

### Myasoedov Yuriy Viktorovich

Amur State University (AMSU).

21, Ignatievskoe highway, Blagoveschensk, 675027, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor, dean of the Faculty of Energy, AMSU.

Phone: +7(4162) 234-730.

E-mail: myv@amursu.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Savina N.V., Myasoedov Yu.V. Development of a mathematical apparatus for studying the current of distributed generation objects. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 3 (59), pp. 105-118 (In Russian).

А. С. Тамбатамба<sup>1</sup>, М. В. Шевлюгин<sup>1</sup>, Т. А. Салахов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС), г. Самара, Российская Федерация

## ОЦЕНКА СПОСОБНОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ЗАМБИИ ВЫДЕРЖИВАТЬ БОЛЬШИЕ ТЯГОВЫЕ НАГРУЗКИ

**Аннотация.** Транспортный сектор Замбии сталкивается со значительными проблемами, в том числе с неадекватной дорожной инфраструктурой, что приводит к высоким затратам на техническое обслуживание автомобильного транспорта, его короткому сроку службы, высокому уровню несчастных случаев со смертельным исходом, заторам и загрязнению воздуха. Железнодорожный сектор сталкивается также с эксплуатационной неэффективностью и конкуренцией со стороны других видов транспорта, что подрывает его эффективность. Электропоезда предлагаются в качестве жизнеспособного решения для модернизации транспортного сектора и повышения качества предоставляемых услуг как для пассажирских, так и для грузовых перевозок. Это исследование направлено на оценку электротехнических возможностей энергосистемы Замбии для обеспечения электропоездов с использованием смешанного подхода, который включает в себя количественный анализ данных о выработке электроэнергии и качественную оценку возможностей инфраструктуры. Полученные результаты указывают на острую необходимость диверсификации источников энергии и модернизации инфраструктуры. В настоящее время установленная генерирующая мощность энергосистемы Замбии составляет приблизительно 3 483,5 МВт, но доступно только 890 МВт, что приводит к дефициту электроэнергии примерно в 1 610 МВт при пиковом потреблении примерно в 2 500 МВт. Ключевые проблемы включают в себя существенную зависимость от гидроэнергетики, что делает систему уязвимой к засухам, и неадекватную инфраструктуру, которая ограничивает интеграцию больших тяговых нагрузок. Рекомендации включают в себя диверсификацию источников энергии, улучшение инфраструктуры и внедрение технологий интеллектуальных сетей для эффективной поддержки работы электропоездов и устойчивых транспортных решений.

**Ключевые слова:** электротехническая система, дефицит электроэнергии, генерация электроэнергии, спрос на электроэнергию, потребление электроэнергии, энергоснабжение.

Abel S. Tambatamba<sup>1</sup>, Maxim V. Shevlyugin<sup>1</sup>, Talgat A. Salakhov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation;

<sup>2</sup>Volga State Transport University (VSTU), Samara, the Russian Federation

## EVALUATING ZAMBIA'S POWER SYSTEM CAPACITY FOR LARGE ELECTRICAL TRACTION LOADS

**Abstract.** Zambia's transport sector faces significant challenges, including inadequate road infrastructure that leads to high maintenance costs, short lifespans, high fatal accident rates, congestion, and air pollution. The railway subsector is also struggling with operational inefficiencies and competition from other transport modes, which undermine its effectiveness. Electric trains are proposed as a viable solution to modernize the transport sector and enhance service delivery for both passenger and freight transport. This research aims to evaluate the electrical engineering capacity of Zambia's power system to support electric trains, employing a mixed-methods approach that includes quantitative analysis of power generation data and qualitative assessments of infrastructure capabilities. Findings indicate a critical need for diversification of energy sources and infrastructure upgrades. Currently, Zambia's power system has an installed generation capacity of approximately 3,483.5 MW, but only 890 MW is available, resulting in a power deficit of around 1,610 MW against a peak demand of approximately 2,500 MW. Key issues include a heavy reliance on hydropower, which makes the system vulnerable to droughts, and inadequate infrastructure that limits the integration of large traction loads. Recommendations include diversifying energy sources, improving infrastructure, and implementing smart grid technologies to effectively support electric train operations and sustainable transport solutions.

**Keywords:** electric power system, power deficit, power generation, power demand, power consumption, power supply.

Республика Замбия – страна, не имеющая выхода к морю, расположенная в южной части Центральной Африки. Ее территория составляет около 753 000 км<sup>2</sup>, а население в 2024 г. оценивается в 21,6 миллиона человек [1 – 3]. Замбия богата минеральными ресурсами,

включая медь, кобальт, цинк, марганец, никель, золото и литий, которые еще больше увеличивают ее экономический потенциал и возможности развития. Эта разнообразная ресурсная база выгодно отличает Замбию с точки зрения как производства энергии, так и добычи полезных ископаемых, что имеет важное значение для обеспечения устойчивого роста и развития [4]. В дополнение к этим минеральным ресурсам Замбия обладает значительным потенциалом для использования различных энергетических ресурсов для производства объемной, надежной, чистой и доступной по цене энергии. Замбия богата разнообразными источниками электроэнергии, включая гидроэнергетику, потенциальная мощность которой до наступления засухи 2023 – 2024 гг. составляла 6000 МВт, а также значительными запасами урана, угля и обильной солнечной энергией, так как на территории этого континента отмечается самое большое количество солнечных дней в году. Страна располагает также геотермальными ресурсами из горячих источников и потенциалом использования биомассы в сельском хозяйстве [5].

Транспортный сектор Замбии сталкивается со значительными проблемами, включая короткий срок службы и высокие затраты на техническое обслуживание автомобильного транспорта, что приводит к высокому уровню несчастных случаев со смертельным исходом, заторам и загрязнению воздуха. Сеть железнодорожных линий работает ниже пропускной способности из-за недостаточной интеграции региональных компаний и снижения объемов перевозок после дерегулирования автомобильного транспорта, что привело к снижению грузооборота на железнодорожном транспорте. Можно отметить высокие постоянные издержки, недостаточные инвестиции в инфраструктуру, устаревание путей и плохое техническое обслуживание. Эти проблемы препятствуют эффективному перемещению товаров и пассажиров, что приводит к задержкам в движении поездов и увеличению расходов. Кроме того, конкуренция со стороны автомобильного транспорта сделала его менее привлекательным для грузоотправителей, что привело к снижению объемов перевозок для железнодорожного управления Танзании-Замбии (TAZARA), годовой объем перевозок которого сократился с более чем 550 000 метрических тонн в 2010 г. до 122 473 метрических тонн в 2015 г. ООО «Замбийские железные дороги» (ZRL) также сталкивается с эксплуатационными проблемами. По состоянию на 2014 г. только 24 из его 37 локомотивов были в рабочем состоянии, а многие вагоны были выведены из эксплуатации [6].

Внедрение электропоездов как для пассажирских, так и для грузовых перевозок в Замбии могло бы значительно облегчить ряд проблем, с которыми сталкивается транспортный сектор страны. Электропоезда являются более экологичным и эффективным видом транспорта, который может помочь снизить загрязнение воздуха и выбросы парниковых газов, связанные с работой дизельных локомотивов. Являясь надежной альтернативой автомобильному транспорту, электропоезда могли бы уменьшить заторы и большое число аварий со смертельным исходом на дорогах Замбии. Кроме того, электропоезда, как правило, имеют более низкие эксплуатационные расходы и затраты на техническое обслуживание по сравнению с тепловозами или локомотивами на дизельном топливе, что потенциально позволяет снизить высокие расходы, которые в настоящее время обременяют железнодорожную систему [7]. Этот переход может также стимулировать рост железнодорожных перевозок, поскольку повышение надежности и скорости обслуживания может привлечь больше грузоотправителей, что в свою очередь способствует увеличению объемов перевозок по железной дороге. Кроме того, внедрение электропоездов и модернизация железнодорожной инфраструктуры, обеспечивающей их движение, могли бы повысить эксплуатационную эффективность и пропускную способность, что в конечном итоге даст экономический рост Замбии и укрепит региональные связи [8].

Понимание электротехнических способностей энергосистемы Замбии для поддержки внедрения электропоездов в стране имеет решающее значение при принятии решения о подключении такой большой тяговой нагрузки. Это исследование продиктовано необходимостью оценить текущее состояние энергетической инфраструктуры Замбии и ее

способность удовлетворять потребности в электропоездах. Используя рецензируемую литературу и другие соответствующие источники, мы стремимся проанализировать структуру и условия эксплуатации энергосистемы, чтобы оценить ее пригодность для приема значительных тяговых нагрузок. Эта оценка позволит получить представление о необходимой модернизации и инвестициях, необходимых для совершенствования энергосистемы, чтобы она могла эффективно поддерживать внедрение электропоездов как для пассажирских, так и для грузовых перевозок.

Это исследование направлено на оценку электротехнического потенциала энергосистемы Замбии для поддержки внедрения электропоездов как для пассажирских, так и для грузовых перевозок, а также на оценку ее текущей пригодности для размещения более крупных тяговых нагрузок. В задачи исследования входят проведение электротехнического анализа текущего состояния электроэнергетической системы Замбии, выявление ключевых проблем, оценка пригодности системы для размещения больших тяговых нагрузок и разработка рекомендаций по повышению эффективности и устойчивости энергосистемы Замбии для обеспечения работы электропоездов.

В ходе исследования будет дана оценка текущего состояния энергосистемы, включая установленные и доступные мощности, эксплуатационную эффективность и условия загрузки, а также будут определены ключевые проблемы, такие как дефицит инфраструктуры и ограничения пропускной способности. Кроме того, будет оценена пригодность системы для удовлетворения потребности в вводе в эксплуатацию электропоездов и предложены рекомендации по повышению эффективности и устойчивости энергосистемы путем необходимой модернизации и интеграции возобновляемых и других источников энергии.

Это исследование актуально, поскольку оно направлено на удовлетворение насущной потребности Замбии в устойчивых транспортных решениях в соответствии с глобальными усилиями по сокращению выбросов углекислого газа и повышению энергоэффективности. Сосредоточив внимание на способности энергосистемы поддерживать движение электропоездов, исследование вносит свой вклад в обсуждение вопросов совершенствования железнодорожной инфраструктуры и стимулирования экономического роста страны за счет улучшения внутренних связей.

Научная новизна этого исследования заключается во всесторонней оценке энергетической системы Замбии в контексте внедрения электропоездов – области, которая еще недостаточно изучена. Объединяя рецензируемую литературу и эмпирические данные, исследование направлено на то, чтобы обеспечить детальное понимание проблем и возможностей, связанных с электрификацией железнодорожной системы, и дать информацию, которая может стать основой для принятия политических решений и инвестиций в инфраструктуру.

В исследовании использовался смешанный методический подход для оценки способности энергосистемы Замбии принимать большие тяговые нагрузки, в частности, электропоезда. Исследование началось с обзора литературы, включающей в себя рецензируемые статьи, газетные статьи и годовые отчеты организаций, с целью сбора данных о текущем состоянии энергосистемы, включая установленную и доступную мощность электростанций, подстанций, линий электропередачи и общую загрузку системы. Был проведен анализ для оценки установленных и доступных мощностей, эксплуатационной эффективности и условий загрузки энергосистемы с целью выявления ключевых проблем, влияющих на отрасль. На основе собранных знаний была проведена оценка определения пригодности системы для работы с большими тяговыми нагрузками и ее способности удовлетворять потребности от эксплуатации электропоездов. Наконец, были предложены рекомендации по повышению эффективности и устойчивости энергосистемы с акцентом на необходимую модернизацию, инвестиции и потенциальную интеграцию возобновляемых и других источников энергии для обеспечения работы электропоездов.

Электроэнергетическая система Замбии играет жизненно важную роль в экономике и развитии страны в первую очередь за счет гидроэнергетики, на долю которой приходится

около 85 % производства электроэнергии. Система управляется несколькими ключевыми игроками, включая ООО «ЗЕСКО» – главную коммунальную компанию, которая курирует большинство электростанций и национальную энергосистему. Несмотря на свой потенциал энергетический сектор Замбии сталкивается со значительными проблемами, такими как низкие показатели электрификации, дефицит инфраструктуры и уязвимость к засухам, вызванным изменением климата, которые привели к дефициту электроэнергии и проблемам с управлением нагрузкой. В 2024 г. эти проблемы привели, по оценкам, к сокращению мощностей по производству гидроэлектроэнергии на 70 % [9].

Важность энергетической системы выходит за рамки электроснабжения, так как она имеет решающее значение для поддержания и развития экономической деятельности государства. В условиях растущего спроса на электроэнергию, обусловленного ростом населения и экономики, повышение мощности энергосистемы и интеграция возобновляемых и других источников энергии имеют важное значение для достижения целей развития Замбии и перехода к более устойчивой энергетике будущего [10].

Электроэнергетическая система Замбии основана преимущественно на гидроэнергетике, и примерно 85 % ее общей установленной мощности приходится на гидроэлектростанции. По состоянию на начало 2023 г. установленная мощность в стране составляла около 3483,5 МВт при доступной мощности в 2503,5 МВт и среднем пиковом потреблении примерно в 2500 МВт. В 2024 г. доступная мощность была сокращена до 890 МВт, что указывает на неустойчивый баланс между выработкой и потреблением. Отрасль электроснабжения Замбии формируется из трех основных подразделений: ООО «ЗЕСКО», Энергетическая корпорация Коппербелт (СЕС) и Гидроэнергетическая компания Лунсемфва (ЛНРС), при этом ООО «ЗЕСКО» является доминирующим игроком, ответственным за большую часть производства, передачи и распределения электроэнергии. В таблице 1 представлены электростанции (ЭС) Замбии, их установленная и доступная мощность, а также права собственности.

Таблица 1 – Установленная и доступная мощность различных электростанций Замбии

№, п/п	Название и тип ЭС	Установленная мощность, МВт	Доступная мощность, МВт	Собственность
1	Северная Кариба ГЭС	1080	100	ООО «ЗЕСКО»
2	Верхнее ущелье Кафуэ ГЭС	990	165	ООО «ЗЕСКО»
3	Нижнее ущелье Кафуэ ГЭС	750	100	ООО «ЗЕСКО»
4	Водопад Виктория ГЭС	108	60	ООО «ЗЕСКО»
5	Лусиваси ГЭС	12	12	ООО «ЗЕСКО»
6	Водопад Чишимба ГЭС	6	6	ООО «ЗЕСКО»
7	Водопад Мусонда ГЭС	5	5	ООО «ЗЕСКО»
8	Лунзуа ГЭС	16	16	ООО «ЗЕСКО»
9	Лусенфва ГЭС	18	16	ЛНРС
10	Мулунгуши ГЭС	28,5	10	ЛНРС
11	Мазутная ЭС «Ндола»	50	50	Энергетическая компания «Ндола»
12	Угольная ТЭС «Маамба»	300	300	ООО Угольная компания «Маамба»
13	Итежи-Тежи ГЭС	120	60	Электроэнергетическая корпорация «Итежи-Тежи»
14	Общая мощность	3483,5	890	

В дополнение к электростанциям, показанным в таблице 1, есть также несколько подключенных к сети солнечных электростанций, таких как солнечная электростанция «Бангвеулу» мощностью 54 МВт, солнечная электростанция «Нгонье» мощностью 34 МВт и солнечная электростанция «Китве» мощностью 34 МВт (СЕС), а также автономные энергосистемы, работающие на солнечной энергии, дизель-генераторы и малые гидроэлектростанции [11] и [12].



Энергосистема Замбии обслуживает различные виды нагрузок, при этом крупнейшим потребителем является горнодобывающий сектор, на долю которого приходится примерно 51 % от общего объема вырабатываемой электроэнергии. За ним следуют потребители в жилом секторе, на долю которых приходится 33 % спроса. Оставшаяся нагрузка распределена между сельскохозяйственным сектором (4 %), коммерческими предприятиями (2 %), государственными службами (6 %) и промышленными объектами (4 %).

В настоящее время Замбия сталкивается с серьезным энергетическим кризисом из-за сочетания ряда факторов, включая изменчивость климата, засухи и несоответствие между имеющимися генерирующими мощностями и пиковым спросом. Продолжающаяся засуха серьезно повлияла на генерирующие мощности крупных гидроэлектростанций, которые являются основным источником электроэнергии в стране. Это привело к длительным перебоям в подаче электроэнергии как жилым, так и промышленным потребителям, при этом бытовые потребители сталкиваются с отключениями до 17 ч в сутки. Дефицит электроэнергии, по оценкам, составляет около 1610 МВт, что привело к повсеместному сокращению расходов на управление нагрузкой, что препятствует способности страны удовлетворять растущие потребности населения и экономики в энергии. Проблемы, стоящие перед электроэнергетической системой Замбии, значительны и требуют немедленного решения для обеспечения надежного и устойчивого энергоснабжения в целях развития страны.

Сильная зависимость системы от гидроэнергетики делает ее уязвимой к изменению климата, о чем свидетельствуют продолжающиеся засухи, которые значительно понизили уровень воды в водохранилищах, что повлияло на генерирующую мощность ключевых электростанций, таких как ущелье Кафуэ и Северная Кариба. Кроме того, неадекватное техническое обслуживание существующих электростанций и устаревающая инфраструктура привели к снижению эффективности и надежности, при этом многие объекты работают дольше, чем планировалось, что приводит к увеличению числа эксплуатационных сбоев и простоев.

Ограниченные инвестиции и финансовые трудности еще больше усугубляют ситуацию, поскольку низкие тарифы на электроэнергию сдерживают частные инвестиции и приводят к финансовым потерям ООО «ЗЕСКО». Уровень электрификации в Замбии остается низким, и лишь около 45 % населения имеют доступ к электричеству, особенно в сельских районах, где этот показатель составляет всего 14,5 %, что препятствует социально-экономическому развитию и усугубляет уровень бедности. Кроме того, страна испытывает значительные потери при передаче и распределении электроэнергии из-за устаревшей инфраструктуры и неадекватных методов технического обслуживания, что еще больше снижает эффективность доставки электроэнергии потребителям.

Существующая энергосистема Замбии столкнется со значительными трудностями при удовлетворении потребностей в потенциально больших тяговых нагрузках, таких как те, которые требуются для пассажирских и грузовых локомотивов или высокоскоростных поездов. Несмотря на то, что установленная мощность в стране составляет около 3483,5 МВт, текущая доступная мощность слишком мала и составляет 890 МВт, что далеко от удовлетворения пикового национального спроса в размере примерно 2500 МВт. Существующий дисбаланс между спросом и предложением не оставляет возможностей для размещения дополнительных крупных грузов.

Передающая система Замбии работает на различных уровнях напряжения, включая 330, 220, 132, 88 и 66 кВ. Линии электропередачи имеют достаточно большую протяженность, особенно в западных и северных регионах, что делает эти районы уязвимыми к нестабильности напряжения.

Результаты исследований показали, что мощность исходных подстанций напряжением 88 и 66 МВт, которые являются основными точками питания локальных сетей, как правило, находится в диапазоне 20 – 70 МВт. Конечные подстанции имеют мощность около 0 – 20 МВт для потенциальных проектов электрификации. Эти ограничения предполагают, что

существующая передающая инфраструктура напряжением 88 и 66 МВт может оказаться не в состоянии удовлетворить высокие требования к мощности при больших тяговых нагрузках, которые могут варьироваться от 1500 до 10 000 кВт и более.

Производство электроэнергии в Замбии в значительной степени зависит от гидроэнергетики, на долю которой приходится около 85 % от общей установленной мощности. Такая сильная зависимость от гидроэнергетики делает систему уязвимой к климатическим изменениям, о чем свидетельствуют недавние засухи, которые значительно снизили уровень воды в водохранилищах и повлияли на генерирующие мощности.

Ограниченный запас мощности в 70 МВт, который в настоящее время используется совместно с подключенными системами в Зимбабве и Демократической Республике Конго, недостаточен для поддержания стабильности системы в случае увеличения тяговых нагрузок. Рекомендуются резерв 180 МВт, что эквивалентно мощности одного энергоблока тепловой электростанции, был бы более подходящим для автономной системы.

Энергосистема Замбии в настоящее время с трудом справляется с требованиями тяговых нагрузок, необходимых для пассажирских и грузовых локомотивов, так, например, полученный анализ энергопотребления электропоездов, основанный на исследовании электрифицированной системы высокоскоростных железных дорог между замбийскими городами Лусака и Китве, дает значительное представление об эксплуатационных требованиях такой системы. Исследование показало, что один скоростной поезд потребляет приблизительно 20 976,07 кВт·ч за поездку, что составляет около 419,5 МВт за 20 поездок в оба конца [14]. Установленная мощность системы составляет приблизительно 3 483,5 МВт, а доступная – всего 890 МВт, что не позволяет удовлетворить пиковый национальный спрос в размере около 2 500 МВт. Существующей передающей инфраструктуре, особенно на подстанциях напряжением 88 и 66 МВт, не хватает мощности для удовлетворения таких высоких потребностей в электроэнергии. Кроме того, сильная зависимость от гидроэнергетики делает систему уязвимой к климатическим изменениям, а ограниченный запас мощности в 70 МВт недостаточен для поддержания стабильности в условиях возросших тяговых нагрузок.

Чтобы энергосистема Замбии могла эффективно справляться с тяговыми нагрузками электропоездов и рядом других потребителей, необходимо диверсифицировать источники энергии, инвестируя в возобновляемую энергию и другие энергетические технологии, которые обладают значительным неиспользованным потенциалом. Также для исключения длительных отключений электроэнергии предлагается рассмотреть искусственное отключение, балансируя нагрузки циклическим перебором. Для этого необходимо выполнить несколько этапов.

1. Разнести получателей энергии по группам с приблизительно равными допустимыми мощностями, так как для применения такой стратегии нужно, чтобы каждая группа имела лимитированную возможность потребления несмотря на то, что в разные отрезки времени расходуется разное количество энергии. При наличии таких групп появляется возможность прогнозировать и регулировать объем энергоресурсов.

2. Определить предельно возможное время отключения одной группы в рамках одних суток.

3. Составить график. После того как выполнены первые два условия, следует всех получателей энергии разнести по временным отрезкам, как показано в таблице 2.

Таблица 2 – График отключений

№	Ж <sub>1</sub>	Ж <sub>2</sub>	Ж <sub>3</sub>	Ж <sub>4</sub>	Ж <sub>5</sub>
Е <sub>1</sub>	А	Д	Г	В	Б
Е <sub>2</sub>	Б	А	Д	Г	В
Е <sub>3</sub>	В	Б	А	Д	Г
Е <sub>4</sub>	Г	В	Б	А	Д

\* Е<sub>1</sub> – Е<sub>4</sub> – временной интервал и Ж<sub>1</sub> – Ж<sub>5</sub> – дни.

Тем не менее модернизация инфраструктуры передачи и распределения электроэнергии необходима для удовлетворения растущего спроса на электропоезда. Кроме того, внедрение технологий интеллектуальных сетей и решений для хранения энергии повысит надежность и эффективность энергосистемы.

Кроме того, рекомендуется провести дальнейшие исследования для моделирования и изучения различных условий эксплуатации энергосистемы. Это включает в себя оценку готовности железнодорожного сектора транспортной отрасли Замбии и моделирование режимов работы энергосистемы для оценки последствий интеграции тяговых нагрузок и дополнительных станций по производству электроэнергии. Такие исследования позволят получить ценную информацию, которая может стать основой для принятия политических решений и инвестиций в инфраструктуру, обеспечивая надежную и быстро реагирующую энергетическую систему.

### Список литературы

1. Republic of Zambia, Zambia power development framework. Ministry of Energy Publ., 2021, 31 p.
2. Republic of Zambia, Zambia Sustainable Development Goals Voluntary National Review 2020. Ministry of National Development Planning Publ., June 2020, 112 p.
3. World population, Zambia population (live). Available at: <http://www.Worldometers.info/worldpopulation/zambia-population/> (accessed 02.09.2024).
4. Sustainable Energy for all, Africa hub // Zambia. Available at: <https://www.se4all-africa.org/seforall-in-africa/country-data/zambia/> (accessed 03.09.2024).
5. Energy in Zambia. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_in\\_Zambia](https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_in_Zambia) (accessed 03.09.2024).
6. Integration of variable renewable energy sources in the National Electric System of Zambia. Available at: [https://rise.esmap.org/data/files/library/zambia/Renewable%20Energy/Zambia\\_Integration-of-Variable-Renewable-Energy-Sources-in-the-National-Electric-System-of-Zambia.pdf](https://rise.esmap.org/data/files/library/zambia/Renewable%20Energy/Zambia_Integration-of-Variable-Renewable-Energy-Sources-in-the-National-Electric-System-of-Zambia.pdf) (accessed 03.09.2024).
7. Тамбатамба, А. С. Особенности электрификации скоростных железнодорожных магистралей в Замбии / А. С. Тамбатамба. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 6 (102). – С. 29–34.
8. Elena Gorkaltseva, Uchivyo Sinkala. Power engineering challenges in Zambia. *MATEC Web of Conferences*, 2017. Available at: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/24/mateconf\\_hmt2017\\_01034.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/24/mateconf_hmt2017_01034.pdf) (accessed 03.09.2024).
9. Past // Journal of Electrical Electronics Engineering. Available at: <https://www.opastpublishers.com/peer-review/system-studies-to-assess-preparedness-of-the-zambian-electrical-grid-for-the-energy-transition-through-integration-of-la-5672.html> (accessed 03.09.2024).
10. Rural Electrification Master Plan. Available at: [https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11871027\\_02.pdf](https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11871027_02.pdf) (accessed 03.09.2024).
11. Republic of Zambia, Expression of interest to participate in scaling - up renewable energy programme. Ministry of Mines, Energy and Water Development Publ., 2020, 10 p.
12. Solar-sector information, Solar power potential Zambia. Available at: <http://www.smartsolar-zambia.com/solar-sector-information/solar-power-potential> (accessed 03.09.2024).
13. World Bank Open Data, Electric power consumption (kwh per capita) // The World Bank. Available at: <https://data.worldbank.org/indicator/eg.use.elec.kh.pc> (accessed 03.09.2024).
14. Тамбатамба, А. С. Электротехническое проектирование электрифицированной высокоскоростной железнодорожной системы, соединяющей Лусаку и Китве / А. С. Тамбатамба, М. В. Шевлюгин. – Текст : непосредственный // Материалы межвузовской научно-практической конференции транспортных вузов. Москва, 27–28 февраля 2024 г. Российский университет транспорта, г. Москва; Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург. – Москва : Дашков и К°, 2024. – С. 246–250.

### References

1. Republic of Zambia, Zambia power development framework. Ministry of Energy Publ., 2021, 31 p.

2. Republic of Zambia, Zambia Sustainable Development Goals Voluntary National Review 2020. Ministry of National Development Planning Publ., June 2020, 112 p.
3. World population, Zambia population (live). Available at: <http://www.Worldometers.info/worldpopulation/zambia-population/> (accessed 02.09.2024).
4. Sustainable Energy for all, Africa hub // Zambia. Available at: <https://www.se4all-africa.org/seforall-in-africa/country-data/zambia/> (accessed 03.09.2024).
5. Energy in Zambia. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_in\\_Zambia](https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_in_Zambia) (accessed 03.09.2024).
6. Integration of variable renewable energy sources in the National Electric System of Zambia. Available at: [https://rise.esmap.org/data/files/library/zambia/Renewable%20Energy/Zambia\\_Integration-of-Variable-Renewable-Energy-Sources-in-the-National-Electric-System-of-Zambia.pdf](https://rise.esmap.org/data/files/library/zambia/Renewable%20Energy/Zambia_Integration-of-Variable-Renewable-Energy-Sources-in-the-National-Electric-System-of-Zambia.pdf) (accessed 03.09.2024).
7. Tambatamba A.S. Features of electrification of high-speed railways in Zambia. *Vestnik transporta Povolzh'ia – Bulletin of transport of the Volga region*, 2023, no. 6 (102), pp. 29-34 (In Russian).
8. Elena Gorkaltseva, Uchivyo Sinkala. Power engineering challenges in Zambia. *MATEC Web of Conferences*, 2017. Available at: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/24/mateconf\\_hmt2017\\_01034.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/24/mateconf_hmt2017_01034.pdf) (accessed 03.09.2024).
9. Past // Journal of Electrical Electronics Engineering. Available at: <https://www.opastpublishers.com/peer-review/system-studies-to-assess-preparedness-of-the-zambian-electrical-grid-for-the-energy-transition-through-integration-of-la-5672.html> (accessed 03.09.2024).
10. Rural Electrification Master Plan. Available at: [https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11871027\\_02.pdf](https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11871027_02.pdf) (accessed 03.09.2024).
11. Republic of Zambia, Expression of interest to participate in scaling - up renewable energy programme. Ministry of Mines, Energy and Water Development Publ., 2020, 10 p.
12. Solar-sector information, Solar power potential Zambia. Available at: <http://www.smartsolar-zambia.com/solar-sector-information/solar-power-potential> (accessed 03.09.2024).
13. World Bank Open Data, Electric power consumption (kwh per capita) // The World Bank. Available at: <https://data.worldbank.org/indicator/eg.use.elec.kh.pc> (accessed 03.09.2024).
14. Tambatamba A.S., Shevlyugin M.V. [Electrotechnical design of an electrified high-speed railway system connecting Lusaka and Kitwe]. *Materialy mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii transportnykh vuzov. Moskva, 27–28 fevralia 2024 g.* [Materials of the interuniversity scientific and practical conference of transport universities. Moscow, February 27-28, 2024]. Moscow : Dashkov & Co. Publ., 2024, pp. 246-250 (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Тамбатамба Абель Симела

Российский университет транспорта  
(ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127055,  
Российская Федерация.

Аспирант ПУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (929) 603-66-74.

E-mail: [abel.tambatamba@mail.ru](mailto:abel.tambatamba@mail.ru)

### Шевлюгин Максим Валерьевич

Российский университет транспорта  
(ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127055,  
Российская Федерация.

Доктор технических наук, доцент, заведующий  
кафедрой «Электроэнергетика транспорта», ПУТ  
(МИИТ).

Тел.: +7 (916) 528-67-68.

E-mail: [mx\\_sh@mail.ru](mailto:mx_sh@mail.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Tambatamba Abel Simela

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

Obraztsova st., 9, st.9, Moscow, 127055, the Russian  
Federation.

Postgraduate student RUT (MIIT).

Phone: +7 (929) 603-66-74.

E-mail: [abel.tambatamba@mail.ru](mailto:abel.tambatamba@mail.ru)

### Shevlyugin Maxim Valerievich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

Obraztsova st., 9, st.9, Moscow, 127055, the Russian  
Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, docent, head of  
the department «Electric Power Engineering of  
Transport», (RUT (MIIT)).

Phone: +7 (916) 528-67-68.

E-mail: [mx\\_sh@mail.ru](mailto:mx_sh@mail.ru)

**Салахов Талгат Альбекович**

Приволжский государственный университет  
путей сообщения (ПривГУПС).

Свободы ул., 2В, г. Самара, 443066, Российская  
Федерация.

Аспирант ПривГУПС.

Тел.: +7 (937) 973-99-96.

E-mail: talgatsalahov@bk.ru

**Salakhov Talgat Albekovic**

Volga State Transport University (VSTU).

Svobody st., 2B, Samara, 443066, the Russian  
Federation.

Postgraduate student of VSTU.

Phone: +7 (937) 973-99-96.

E-mail: talgatsalahov@bk.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Тамбатамба, А. С. Оценка способности энергосис-  
темы Замбии выдерживать большие тяговые нагрузки /  
А. С. Тамбатамба, М. В. Шевлюгин, Т. А. Салахов. –  
Текст : непосредственный // Известия Транссиба. –  
2024. – № 3 (59). – С. 119 – 128.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Tambatamba A.S., Shevlyugin M.V., Salakhov T.A.  
Evaluating Zambia's power system capacity for large  
electrical traction loads. *Journal of Transsib Railway  
Studies*, 2024, no. 3 (59), pp. 119-128 (In Russian).

УДК 681.5

**А. С. Маниковский<sup>1</sup>, Д. А. Яковлев<sup>1</sup>, А. Ю. Мухопад<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения (ЗабИЖТ ИрГУПС)», г. Чита, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ УПРАВЛЯЮЩЕГО АВТОМАТА

**Аннотация.** Прогнозирование уровня потребления электроэнергии в условиях установившихся рыночных отношений между потребителем и поставщиком электрической энергии является важной задачей. Прогноз электропотребления является ключевым показателем для дальнейшего планирования спроса потребителей и уменьшения затрат на генерацию и транспортировку электроэнергии. В случае составления неточной заявки на планируемый объем электропотребления предприятие вынуждено закупать или продавать электрическую энергию по заранее невыгодной цене. Таким образом, повышение точности алгоритмов и методов прогнозирования уровня потребления электрической энергии является важной и актуальной задачей. Наиболее успешно с поставленной задачей справляются современные методы прогнозирования, а именно методы, основанные на применении нейронных сетей. Нейронные сети способны обрабатывать большой объем данных, выделять и обобщать зависимости между значениями, что является преимуществом в сравнении с другими известными методами прогнозирования. Однако существующие нейронные сети не являются совершенными решениями и имеют ряд недостатков. При вычислении результата нейронными сетями по конкретному набору исходных данных не учитываются динамика и изменение этих данных. В задаче прогнозирования потребления электрической энергии помимо мгновенных входных данных требуется анализировать предысторию возникновения таких данных. Авторами предложено повысить точность прогнозирования электропотребления за счет ввода в структуру нейронной сети управляющего автомата. Автомат, обрабатывая входные данные по заданному алгоритму, анализирует динамику изменения временного ряда электропотребления. Нейронная сеть в таком случае делает прогноз на основе выделенных характеристик, что позволяет увеличить точность прогнозов и скорость их построения.

**Ключевые слова:** электропотребление, тяга поездов, прогнозирование электропотребления, нейронная сеть, управляющий автомат.

**Andrey S. Manikovskij<sup>1</sup>, Dmitriy A. Yakovlev<sup>1</sup>, Alexander Yu. Muhopad<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University (ZRTI ISTU),  
Chita, the Russian Federation;

<sup>2</sup>Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation

## AUTOMATION OF THE PROCESS OF PREDICTING ELECTRIC CONSUMPTION IN RAILWAY TRANSPORT USING A CONTROL AUTOMATIC

**Abstract.** Forecasting the level of electricity consumption in the conditions of established market relations between the consumer and the supplier of electric energy is an important task. The forecast of electricity consumption is a key

*indicator for further planning of consumer demand, reducing the cost of generating and transporting electricity. In the case of an inaccurate application for the planned amount of electricity consumption, the company is forced to purchase or sell electric energy at a previously unfavorable price. Thus, improving the accuracy of algorithms and methods for predicting the level of electric energy consumption is an important and urgent task. Modern forecasting methods, namely methods based on the use of neural networks, cope with the task most successfully. Neural networks are able to process a large amount of data, isolate and generalize dependencies between values, which is an advantage in comparison with other known forecasting methods. However, existing neural networks are not perfect solutions and have a number of disadvantages. When calculating the result by neural networks for a specific set of source data, the dynamics and changes in this data are not taken into account. In the task of forecasting electric energy consumption, in addition to instantaneous input data, it is necessary to analyze the background of the occurrence of such data. The authors propose to increase the accuracy of forecasting power consumption by introducing a control automaton into the structure of the neural network. The automaton, processing the input data according to a given algorithm, analyzes the dynamics of changes in the time series of power consumption. In this case, the neural network makes a forecast based on the selected characteristics, which allows you to increase the accuracy of forecasts and the speed of their construction.*

**Keywords:** power consumption, train traction, forecasting of power consumption, neural network, control automaton.

Основным направлением энергетической стратегии железнодорожного транспорта является снижение расходов электрической энергии (ЭЭ) и сокращение затрат на ее приобретение [1].

ОАО «РЖД» входит в тройку крупнейших потребителей электроэнергии в стране. В 2022 г. компания использовала 48,4 млрд кВт·ч (около 4 % от всего потребления). Существующие потребители ОАО «РЖД» получают электроэнергию от основного поставщика – ООО «Русэнергосбыт». Поставщик реализует электроэнергию в рамках розничных рынков электрической энергии (РРЭ), приобретенной на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ). Правилами функционирования энергорынков установлена обязанность потребителей по точному планированию объемов электропотребления (ЭП). Отклонение в потреблении ЭЭ от запланированной величины ведет к дополнительным издержкам.

Модели ОРЭМа и РРЭ требуют от ОАО «РЖД» решения комплекса задач, из которых основными являются проведение анализа и детального планирования электропотребления. Это требует совершенствования методов и алгоритмов прогнозирования с применением современных технологий обработки информации. Повышение точности прогнозирования потребления электроэнергии позволит уменьшить затраты на приобретение ЭЭ и существенно улучшить качество управления электропотреблением электроустановок на железнодорожном транспорте.

Существует ряд отличий в принципах электропотребления на железнодорожном транспорте от электропотребления любого другого предприятия. Современные условия работы железнодорожного транспорта характеризуются неравномерностью загрузки системы по времени и сложностью условий эксплуатации, что затрудняет формирование полной исходной базы данных, которая характеризует рассматриваемый объект [2]. Для тягового электропотребления, которое составляет 85 % от общего электропотребления ОАО «РЖД», характерно скачкообразное изменение объемов потребления электроэнергии. Все эти факторы осложняют процесс прогнозирования ЭП, что требует совершенствования методов прогнозирования.

Эффективным способом прогнозирования электропотребления в настоящее время являются нейронные сети (НС). Применение нейронных сетей позволяет строить прогнозы ЭП высокой точности в сравнении с другими известными методами. Это обусловлено тем, что НС способны обрабатывать большой объем данных, обобщать и выделять скрытые зависимости между входными и выходными значениями [3, 4]. Нейронные сети позволяют моделировать разного рода зависимости, в основе которых могут быть линейные, обобщенно линейные и нелинейные модели [5].

Среди всего многообразия нейронных сетей наилучшим образом в задаче прогнозирования проявили себя рекуррентные нейронные сети (Recurrent neural network,

RNN) [6]. Рекуррентные нейронные сети используют направленную последовательность связи между узлами (рисунок 1).

В RNN результат вычислений на каждом этапе используется в качестве исходных данных для следующего. Благодаря этому рекуррентные нейронные сети могут обрабатывать серии событий во времени или последовательности для получения результата вычислений.

Для использования НС в задаче прогнозирования необходимо ее обучить [7]. Процесс обучения нейронной сети для прогнозирования тягового электропотребления выглядит следующим образом: на вход нейронной сети подается обучающая выборка, а на выходе сети – экзаменующая, которая используется для оценки прогностических способностей сети. Таким образом, для построения прогноза необходимы значения ЭП за предыдущие периоды, которые, проходя через нейронную сеть, обрабатываются в соответствии с весовыми коэффициентами, сопоставляются с ожидаемыми значениями, на основе чего анализируются показатели точности решения задачи.

Несмотря на преимущества нейронных сетей в задаче прогнозирования над традиционными вычислениями они не являются совершенными решениями. Нейронная сеть вычисляет результат по конкретному набору исходных данных, не учитывая динамику и изменение этих данных в задаче прогнозирования электропотребления, где помимо мгновенных входных данных требуется анализировать предысторию возникновения таких данных. Для этой цели предлагается использовать управляющие автоматы (УА). На рисунке 2 приведена схема синтеза НС и УА.

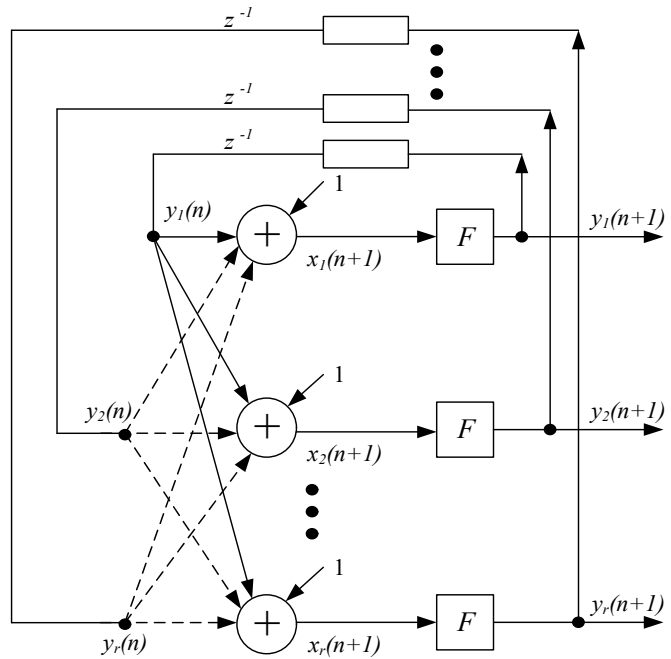


Рисунок 1 – Структура прогнозной нейронной сети

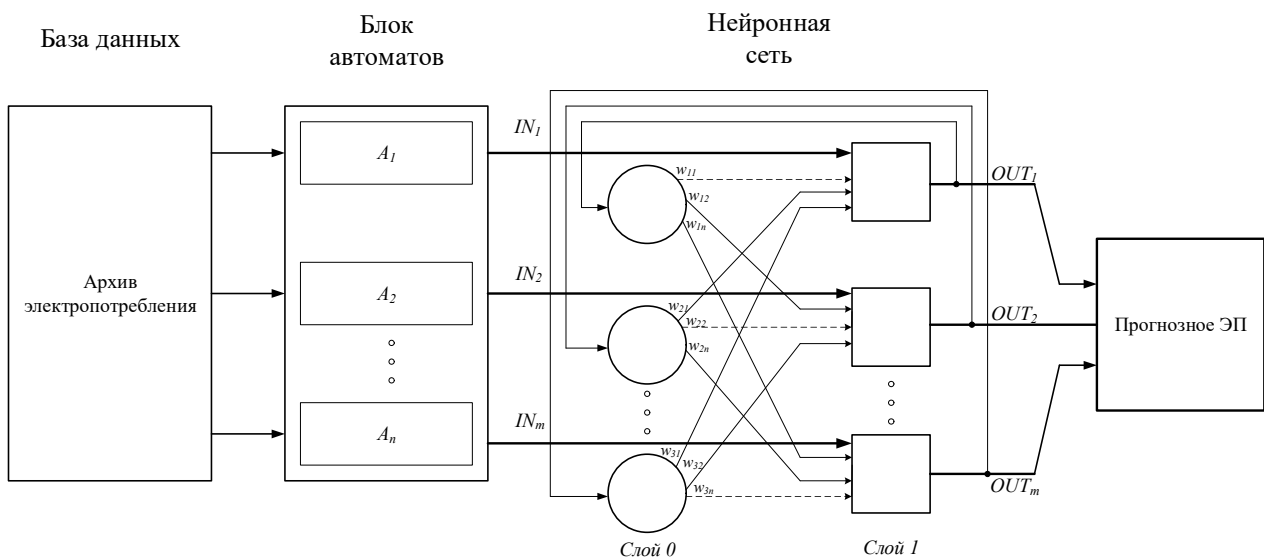


Рисунок 2 – Схематическое изображение взаимодействий

При помощи УА производится предварительный анализ – выделяются параметры, которые невозможно измерить для одного конкретного входного значения, но которые видны

при обзоре всей динамики происходящих процессов. Автоматами анализируются динамика изменения временного ряда электропотребления и динамика изменения влияющих факторов. Эти параметры обрабатываются нейронной сетью, которая на их основе производит прогноз. Входной слой нейронной сети связан в таком случае не с конкретными значениями процесса электропотребления, а с выделенными характеристиками значений (тренд, сезонность, случайные возмущения), по которым производится прогноз.

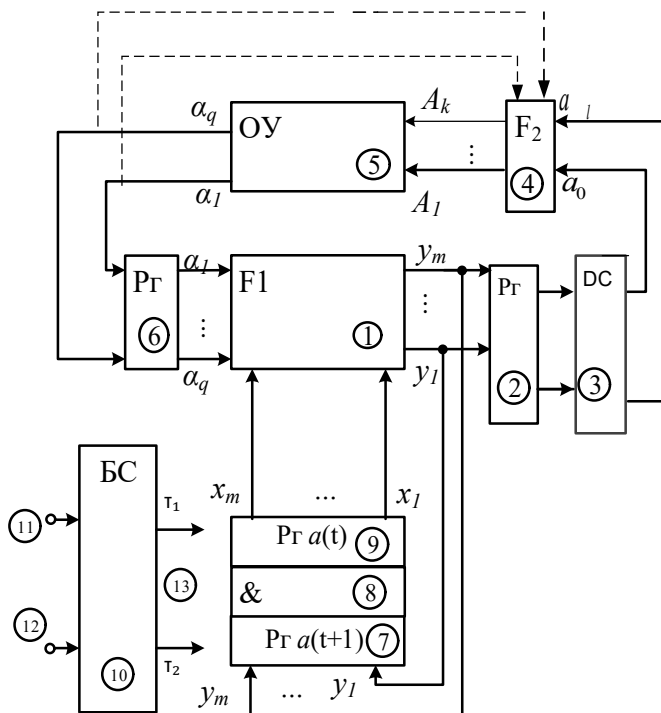


Рисунок 3 – Структурная организация автомата Мура и Мили (пунктирные связи относятся только к УА Мили)

В подавляющем числе применений используются автоматы со структурной организацией Мура и Мили (рисунок 3) [8, 9].

При реализации таких систем более 50 % затрат оборудования могут составлять УА. Снижения затрат при реализации комбинационных схем достигали за счет сокращения числа состояний, декомпозиции графов или алгоритмов и минимизации систем булевых функций. В настоящее время достигнуто снижение сложности комбинационных схем в 1,2 – 1,5 раза. В связи с этим возникла необходимость разработки новой методологии синтеза УА для уменьшения количества элементов и снижения сложности блока контроля управляющего автомата с контролем состояний [10].

Перед абстрактным синтезом УА в граф-схему алгоритма управления (ГСА) вводятся пустые операторы (рисунок 4), которые обозначены как операторы действия  $A_0 \dots A_k$ , но без номера [11]. По ГСА получен граф переходов (рисунок 5).

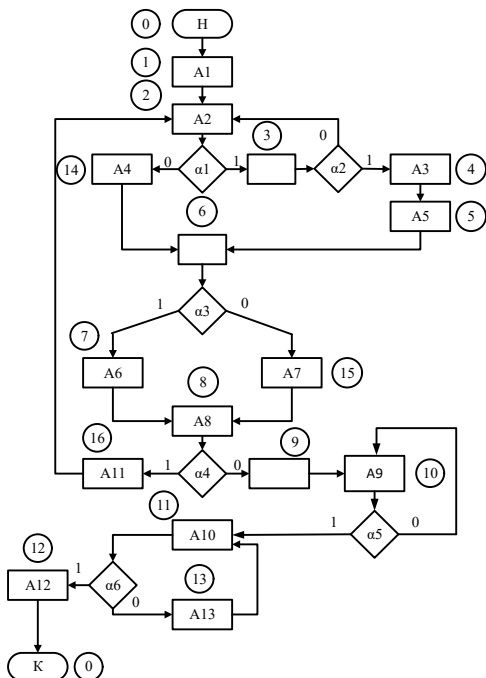


Рисунок 4 – Граф-схема алгоритма управления УА с пустыми операторами

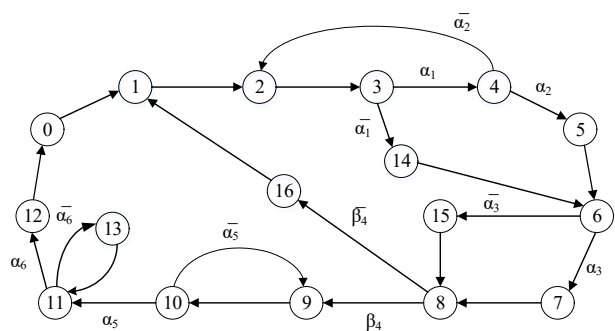


Рисунок 5 – Граф переходов УА

Пустые операторы ( $A_n$ ) вводятся в следующих случаях:

- если к логическому оператору  $\alpha_j$  передается управление от двух (или более) других операторов;
- для ликвидации петель;
- для ограничения количества входов к любому оператору до двух;
- если между  $\alpha_i$  и  $\alpha_j$  нет операторов действия.

Структурная схема предлагаемого УА с контролем состояний представлена на рисунке 6.

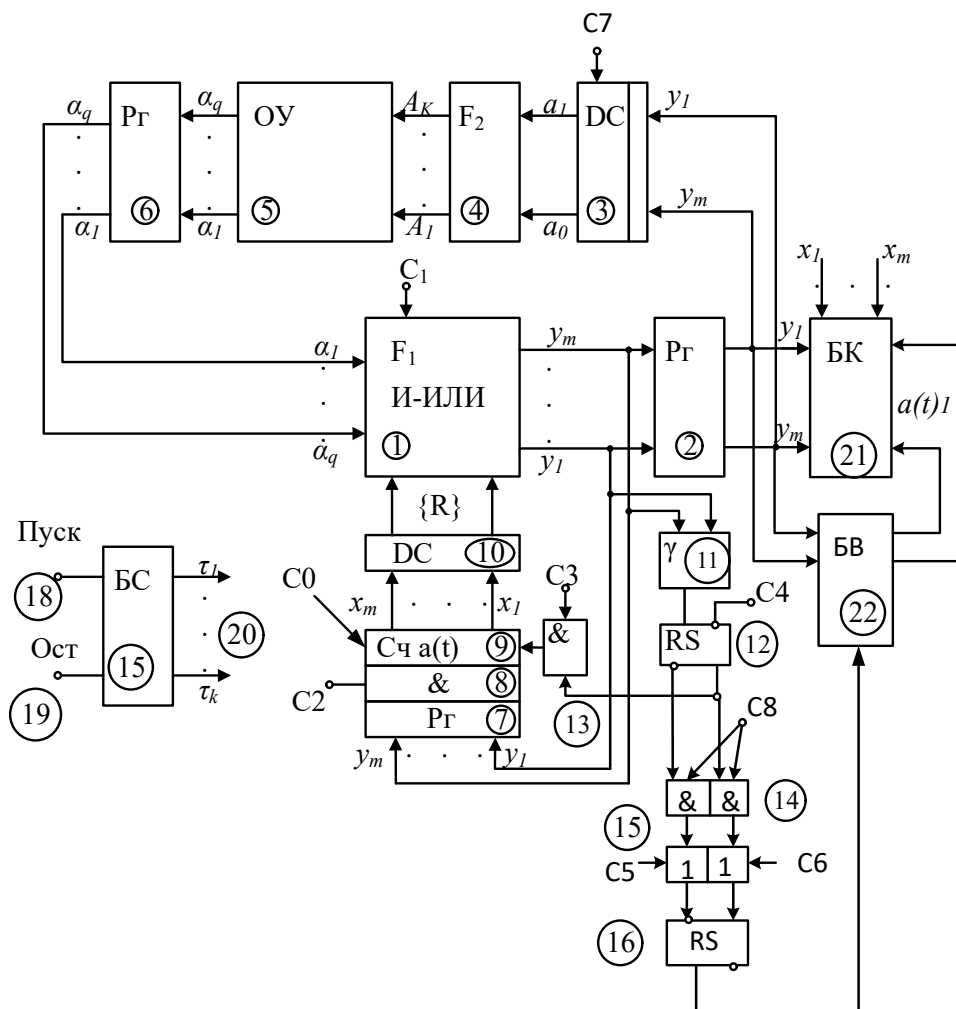


Рисунок 6 – Структурная схема предлагаемого УА

Анализ структурной схемы предлагаемого УА позволяет сделать следующие заключения.

1. Используется унитарный (унарный) код для представления состояний  $a(t)$ .
2. Вместо регистра состояний  $a(t)$  используется суммирующий счетчик Сч (9).
3. Введена последовательность блоков БО (11), RS-триггер (12), схема «И» (13) для определения признака  $\gamma$  необходимости прибавления «1» к содержимому счетчика.
4. Введен второй дешифратор DC (10) для перевода двоичного позиционного кода (ДПК) в унитарный код.
5. Введены элементы «И» (14), «ИЛИ» (15) для переноса состояния RS-триггера (12) на дополнительный RS-триггер (16). RS-Триггер (16) дает возможность хранить предыдущее значение  $\gamma(t-1)$  или текущее значение  $\gamma$  для дальнейших вычислений. Необходимость учета значений  $\gamma(t-1)$  связана с тем, что для некоторых состояний, имеющих два входа (для рисунка 5 это переходы 6, 8, 9, 11), один вход соответствует  $\gamma(t-1) = 1$ , а второй  $\gamma(t-1) = 0$ .
6. Введен блок восстановления БВ (22), определяющий значение  $a(t)$  по конкатенации  $\gamma(t-1)$  с кодом  $a(t+1)$ , обозначенное как  $a(t)_1$ .

Проведенный анализ известных управляющих автоматов Мура и Мили дал возможность сделать заключение о том, что сложность комбинационных схем автоматов связана с отсутствием адресной подсистемы, так как все множество логических условий  $\alpha_1 \dots \alpha_q$  подается на вход схемы переходов и схемы формирования команд УА Мили.

Предложенная методология синтеза определила возможность создания оригинальных структур УА, обеспечивающих снижение затрат на комбинационную схему переходов на постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) в  $Q = 2^{q-1}$  раз или уменьшение количества входов программируемой логической матрицы (ПЛИМ) схемы переходов в два – три раза [10].

Структурная схема предлагаемой методики прогнозирования представлена на рисунке 7.



Рисунок 7 – Структурная схема предлагаемой модели прогнозирования

Для задачи прогнозирования внешней средой является формируемая из архива электропотребления база данных, полученная из автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ). По окончании сбора данных происходит предварительный анализ данных при помощи управляющих автоматов: выделение характеристик временного ряда, таких как тренд, сезонность и случайные возмущения. Затем выделенные характеристики временного ряда подаются на входы нейронной сети, которые анализируются ею. Далее происходит построение временного ряда текущего ЭП, который сравнивается с реальными показаниями величины ЭП. Если уровень ошибки не превышает допустимых значений, то происходит построение прогноза потребления ЭЭ для заданного периода упреждения. В противном случае происходит диагностика системы на каждом этапе работы

предлагаемой методики: проверка корректности исходных данных и проверка работоспособности УА и НС.

После построения прогноза необходимого периода упреждения формируется прогнозная база данных, которая будет использована при формировании заявки на закупку ЭЭ.

На рисунке 8 представлено сравнение фактического ЭП с результатами прогноза нейронными сетями и предложенной методикой.

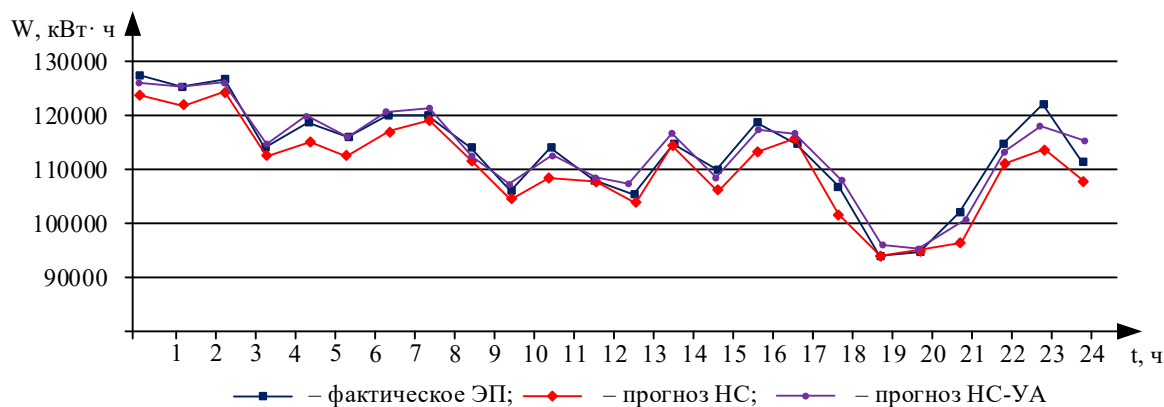


Рисунок 8 – Сравнение прогноза ЭП

В качестве исходных данных был использован архив электропотребления тяговой подстанцией Белогорск Забайкальской железной дороги за 2022 г., горизонт прогноза составил 24 ч. При прогнозировании методом, основанным на работе только нейронной сети, величина отклонений составила 6,8 %. Временной ряд, построенный с применением предложенной методики, более точно описывает временной ряд фактического ЭП, а величина отклонений составляет 3 %, что свидетельствует о ее работоспособности. Таким образом, предложенная методика взаимодействия НС и УА позволяет повысить точность и скорость прогнозирования ЭП. В свою очередь повышение точности прогнозирования потребления электроэнергии позволит уменьшить затраты на приобретение ЭЭ и существенно улучшить качество управления электропотреблением электроустановок на железнодорожном транспорте.

### Список литературы

1. Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года, утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2537р. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – Текст : непосредственный.
2. Осипова, В. Э. Применение нейросетевых методов прогнозирования электропотребления на железнодорожном транспорте / В. Э. Осипова, Д. А. Яковлев. – Текст : непосредственный // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2022. – Т. 18. – № 1. – С. 107–118.
3. Староверов, Б. А. Схемы взаимодействия поставщиков и получателей прогнозов электропотребления на основе использования нейросетевой информационной системы / Б. А. Староверов, И. В. Семенов. – Текст: электронный. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4784](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4784) (дата обращения: 10.07.2024) // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 1. – EDN: XSMPPN.
4. Кретов, Д. А. Прогнозирование электропотребления энергосбытовой компании с использованием искусственной нейронной сети / Д. А. Кретов, Р. В. Рузанов – Текст : электронный. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2880](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2880) (дата обращения: 10.07.2024) // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2. – EDN: UGRUIX.
5. Гудфеллоу, Я. Глубокое обучение / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвилль; перевод с английского А. А. Слинкина. – 2-е изд. – Москва : ДМК Пресс, 2018. – 652 с. – Текст : непосредственный.

6. Использование рекуррентных сетей для прогнозирования потребления электроэнергии / С. Л. Подвальный, М. А. Лихотин, А. В. Михайлузов, А. К. Донских. – Текст : непосредственный // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18. – № 3. – С. 45–50.

7. Шурова, Н. К. Применение программного комплекса МАТЛАВ к прогнозированию электропотребления на тягу поездов / Н. К. Шурова, В. Н. Ли. – Текст : непосредственный // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2021. – № 3 (28). – С. 43–49.

8. Структурная организация управляющих автоматов вычислительных и информационно-измерительных систем / Ю. Ф. Мухопад, А. Ю. Мухопад, Д. Ц. Пунсык-Намжилов, А. С. Маниковский. – Текст : непосредственный // Автотрибуна. – 2021. – Т. 57. – № 4. – С. 65–73.

9. Кудрявцев, В. Б. Теория автоматов : учебник / В. Б. Кудрявцев, С. В. Алешин, А. С. Подколзин. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2018. – 320 с. – Текст : непосредственный.

10. Патент № 2793301 С1 Российская Федерация, МПК G11С 11/00. Управляющий автомат с контролем состояний : № 2022118502 : заявлено 05.07.2022 : опубликовано 31.03.2023 / А. Ю. Мухопад, А. С. Маниковский; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения». – Текст : непосредственный.

## References

1. Energy strategy of the JSC Russian Railways for the period until 2020 and for the future until 2030, approved. configurations of JSC Russian Railways dated December 14, 2016 No. 2537r. Moscow, JSC Russian Railways Publ., 2016 (In Russian).

2. Osipova V.E., Yakovlev D.A. Place of Neural Network Methods for Predicting Power Consumption in Railway Transport. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie – Modern Information Technologies and IT-Education*, 2022, vol. 18, no. 1, pp. 107-118 (In Russian).

3. Staroverov B.A., Semenov I.V. Ways of interaction between providers and consumers of forecasts of Electrical Power consumption based on Neural Network information system. *Inzhenernyi vestnik Dona – Engineering Journal of Don*, 2018, no. 1. Available at: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4784](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4784) (accessed 10.07.2024), EDN: XSMPPN (In Russian).

4. Kretov D.A., Ruzanov R.V. Using of Artificial Neural Network for Forecasting of Electric Power consumption by Energy Provider. *Inzhenernyi vestnik Dona – Engineering Journal of Don*, 2015, no. 2. Available at: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2880](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2880) (accessed 10.07.2024), EDN: UGRUIX (In Russian).

5. Gudfellou Ya., Bendzhio I., Kurvill' A. *Glubokoe obuchenie* [Deep Learning]. Moscow, DMK Press Publ., 2018, 652 p. (In Russian).

6. Podval'nyi S.L., Likhotin M.A., Mikhailusov A.V, Donskikh A.K. Using recurrent networks to predict electricity consumption. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2022, vol. 18, no. 3, pp. 45-50 (In Russian).

7. Shurova N.K., Li V.N. Application of Matlab software package to Forecasting Power Consumption for hauling operations. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona – Pacific Rim countries transportation system*, 2021, no. 3 (28), pp. 43-49 (In Russian).

8. Mukhopad Yu.F., Mukhopad A.Yu., Punsyk-Namzhilov D.Ts., Manikovskii A.S. The Structural Organization of Control Automata for Computing and Information-Measuring Systems. *Avtometriia – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 65-73 (In Russian).

9. Kudriavtsev V.B., Aleshin S.V., Podkolzin A.S. *Teoriia avtomatov: uchebnik* [Automata Theory: textbook]. Moscow, Yurayt Publ., 2018, 320 p. (In Russian).

10. Mukhopad A.Yu., Manikovskii A.S. *Patent RU 2793301 C1*, 31.03.2023.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Маниковский Андрей Сергеевич

Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения (ЗабИЖТ ИрГУПС)».

Магистральная ул., д. 11, г. Чита, 672040, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Электроснабжение», ЗабИЖТ ИрГУПС.

Тел.: +7 (924) 277-82-48.

E-mail: andrey-18@mail.ru

### Яковлев Дмитрий Александрович

Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения (ЗабИЖТ ИрГУПС)».

Магистральная ул., д. 11, г. Чита, 672040, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение», ЗабИЖТ ИрГУПС.

Тел.: +7 (914) 502-82-80.

E-mail: d5028280@mail.ru

### Мухопад Александр Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», ИрГУПС.

Тел.: +7 (902) 172-45-53.

E-mail: jcmg@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Маниковский, А. С. Автоматизация процесса прогнозирования электропотребления на железнодорожном транспорте с применением управляющего автомата / А. С. Маниковский, Д. А. Яковлев, А. Ю. Мухопад. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 3 (59). – С. 128 – 136.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Manikovskij Andrej Sergeevich

Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University (ZRTI ISTU).

11, Magistralnaya st., Chita, 672040, the Russian Federation.

Senior lecturer of the department «Power Supply», ZRTI ISTU.

Phone: +7 (924) 277-82-48.

E-mail: andrey-18@mail.ru

### Yakovlev Dmitrij Aleksandrovich

Zabaikalsk Rail Transport Institute, a branch of Irkutsk State Transport University (ZRTI ISTU).

11, Magistralnaya st., Chita, 672040, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Power Supply», ZRTI ISTU.

Phone: +7 (914) 502-82-80.

E-mail: d5028280@mail.ru

### Muhopad AleksandrYur'evich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Automation of production processes», ISTU.

Phone.: +7 (902) 172-45-53.

E-mail: jcmg@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Manikovskij A.S., Yakovlev D.A., Muhopad A.Yu. Automation of the process of forecasting power consumption in railway transport using a control automatic. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 3 (59), pp. 128-136 (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 (образец прилагается).
  6. Согласие на обработку персональных данных от каждого автора (соавтора) статьи (образец прилагается).
- В тексте статьи обязательно указываются тематический раздел журнала, в который подается статья, и научная специальность, которой эта статья 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, подрисовочные 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 всегда должны находиться на одной и той же строке;

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 / Journal of Transsib Railway Studies»

№ 3 (59) 2024

Научно-технический журнал «Известия Транссиба / Journal of Transsib Railway Studies» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзором), регистрационный номер ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в интернет-каталоге «Пресса по подписке» ([www.akc.ru](http://www.akc.ru)) – E28002.

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](mailto:izvestia_transsiba@mail.ru)

Подписано в печать 30.09.2024.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 04.10.2024.

