

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
ОАО «Российские железные дороги»
Международная ассоциация транспортных университетов стран
Азиатско-Тихоокеанского региона (МАТУ АТР)
Омский государственный университет путей сообщения



**НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ФОРУМ
«ТРАНССИБВУЗ-2020»
МАТЕРИАЛЫ ЧЕТВЁРТОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**



**РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ
И СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ
И НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА**

Омск 2020

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
ОАО «Российские железные дороги»
Международная ассоциация транспортных университетов стран Азиатско-
Тихоокеанского региона (МАТУ АТР)
Омский государственный университет путей сообщения



Научно-образовательный форум «ТРАНССИБВУЗ – 2020»

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ И НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА

Материалы четвертой международной
научно-практической конференции
(10 декабря 2020 г.)

Посвящается 75-летию победы в Великой Отечественной войне
85-летию кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта»
120-летию Омского государственного университета путей сообщения

Омск 2020

УДК 006
ББК 30.10
П75

«Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта»: Материалы четвертой международной научно-практической конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2020. 312 с.

В материалах конференции рассмотрены прорывные технологии разработки и эффективной эксплуатации электротехнических комплексов и систем энергетики, системы мониторинга и управления энергоэффективностью наземного транспорта, системы энергообеспечения, основные положения политики энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Представлены результаты исследований по энергетической эффективности железных дорог, оценки энергетической эффективности устройств и систем, способам повышения качества электрической энергии.

Представленные в сборнике материалы могут быть использованы при модернизации существующих и создании новых типов электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта, совершенствовании процессов их эксплуатации, технического обслуживания и ремонта.

Материалы публикуются в авторской редакции.

Библиогр.: 242 назв. Табл. 44. Рис. 126.

Редакционная коллегия:

доктор техн. наук, профессор В. Т. Черемисин (отв. редактор);
доктор техн. наук, профессор В. В. Харламов;
доктор техн. наук, профессор А. А. Кузнецов;
доктор техн. наук, профессор О. А. Сидоров
доктор техн. наук, доцент С. Г. Шантаренко (зам. отв. редактора).

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор,
засл. деятель науки РФ В. А. Аксенов;
доктор техн. наук, профессор Ю. А. Давыдов.

ISBN 978-5-949-41269-5

© Омский гос. университет
путей сообщения, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ И КАЧЕСТВО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ СКОРОСТНОГО И ВЫСОКОСКОРОСТНОГО НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА

Бутенко Е. А., Смердин А. Н., Голубков А. С. Повышение эффективности эксплуатации системы токосъема за счет онлайн мониторинга основных параметров контактной сети.....	6
Алексеева П. В. Анализ методов и технических средств защиты подземных металлических сооружений от блуждающих токов.....	12
Горькин А. В., Хусаинов Е. К. Определение величины отклонения фактического тока отключения быстродействующих выключателей от тока уставки.....	18
Москалев Ю. В., Маркаускас С. А. Литий-титанатные аккумуляторы как накопители энергии автономных локомотивов.....	28
Утепбергенова С. М., Томилов В. В., Сидоров О. А. Математическая модель теплового состояния верхнего узла токоприемника магистрального электроподвижного состава.....	35
Губин И. В., Куракина В. Д., Изотов А. И., Тимина Н. В., Фоминых А. А. Повышение ресурса узлов скользящего токосъема, работающих при отсутствии токовой нагрузки.....	42
Незевак В. Л., Самолинов С. С., Хусаинов Е. К. Оценка эффективности применения систем накопления электроэнергии для обеспечения собственных нужд тяговых подстанций постоянного тока.....	49

БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сухарукова А. Н., Хорошавина А. А. Аспекты мониторинга и управления качеством электрической энергии тяговых подстанций переменного тока.....	57
Костин А. П. К вопросу применения цифровых технологий в системе тягового электроснабжения переменного тока.....	64
Громыко И. Л., Галушко В. Н., Белькин В. О. Диагностика трансформатора с использованием комплексного анализа данных приборного учета при межвитковых замыканиях.....	69
Сальников А. А., Галкин А. Г. Цифровизация железнодорожного транспорта.....	82
Чижма С. Н., Молчанов С. В., Стригин И. В. Определение составляющих уравнительного тока с использованием синхронно-векторных измерений.....	87

Лысенко В. С. Моделирование схемы подключения трехфазной обмотки асинхронного двигателя к однофазной сети при различных значениях нагрузки на валу	97
Ковалев А. А., Шелюг С. Н., Шаюхов Т. Т. Разработка методики расчета потерь электроэнергии при нелинейной и несимметричной нагрузке	103
Малютин А. Г., Циркин В. С. Применение технологий ПИОТ в системах мониторинга объектов энергоснабжения	110

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ТЯГИ ПОЕЗДОВ НА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ И НЕЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

Макашева С. И., Мамаев А. Р. К вопросу повышения энергоэффективности рекуперации электрической энергии в тяговой сети переменного тока	117
Мельников В. А. Статистический анализ данных МСУ-ТП тепловозов 2ТЭ116У с использованием программ на VBA	124
Пиндюк О. В. Анализ существующих методик определения потерь в тяговой рельсовой сети постоянного тока	133
Хромов И. Ю. Метод определения влияния режимов эксплуатации на техническое состояние локомотива	138
Бакланов А. А., Есин Н. В., Шиляков А. П. Особенности энергетики электрической тяги переменного тока	144
Аблялимов О. С. Нормирование расхода топлива на перевозочную работу локомотивов дизельной тяги	150
Третьяков Е. А. Оценка эффективности внедрения интеллектуальной энергетической инфраструктуры железных дорог на базе цифровых подстанций	156
Никифоров М. М. Методика определения технологического расхода электроэнергии на участках, находящихся под сохранным напряжением	168
Вильгельм А. С. Подходы к созданию интеллектуальной технологии планирования энергоэффективности тяги поездов	175
Истомин С. Г. Оценка эффективности методов и средств снижения потребления электроэнергии электроподвижным составом при отстое на тракционных путях депо	183
Иванов А. А., Истомин С. Г. Разработка предложений по созданию омского центрального кольца (ОЦК) с использованием современного моторвагонного подвижного состава	193
Незевак В. Л., Черемисин В. Т. Совершенствование методов и алгоритмов расчета энергетических показателей системы тягового электроснабжения	204

ИССЛЕДОВАНИЕ, ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТРАНСПОРТА

Веселка Ф. , Пишала Я. , Забоин В. Н. Длительные испытания инновационного скользящего контакта на локомотиве узкоколейной железной дороги в Чехии	211
Харламов В. В., Попов Д. И., Ахмедзянов Г. Г. Определение мощности, потребляемой асинхронным двигателем и вырабатываемой нагрузочным генератором в схеме взаимной нагрузки.....	226
Зуев А. С. Оптимизация конструкции тяговых электродвигателей.....	233
Рожницкий Д. Б. , Рыбак А. А., Новиков А. Ю. К вопросу организации отопления служебных помещений с различными требованиями к поддержанию значений внутренней температуры в производственных зонах	239
Каштанов А. Л., Комяков А. А., Никифоров М. М. Анализ влияния современных тенденций развития топливно-энергетического комплекса России на железнодорожный транспорт.....	251
Гусаров А. С. , Овсянников В. В. Повышение эффективности управления паротурбинной установкой при выработке электрической энергии на ТЭС	258
Истомин С. Г., Авдиенко Е. Г. Анализ существующих систем автоведения и систем информирования машиниста электроподвижного состава	264
Перестенко А. Е. , Истомин С. Г. Экспериментальные исследования онлайн мониторинга эксплуатационных показателей электроподвижного состава и устройств электроснабжения.....	270
Глухов С. В., Глухова М. В., Коршунова В. В. Повышение эффективности локальных систем электроотопления.....	288
Сапрыгина Э. Е. , Финиченко А. Ю. Эффективность использования солнечной энергии в электротехнических системах стационарной энергетики.....	297
Энх-Амгалан Алтангэрэл Перспективный вариант системы тягового электроснабжения для электрификации трансмонгольской магистрали	304

«РАБОТОСПОСОБНОСТЬ И КАЧЕСТВО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ СКОРОСТНОГО И ВЫСОКОСКОРОСТНОГО НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА»

УДК 681.518.5

Бутенко Е. А., Смердин А. Н., Голубков А. С.

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ ТОКОСЪЕМА ЗА СЧЕТ ОНЛАЙН МОНИТОРИНГА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

В статье рассматривается метод повышения эффективности системы токосъема за счет онлайн мониторинга контактной сети. Данный метод позволяет по частоте колебаний проводов определить ряд параметров, по которым можно оценить состояние контактной подвески. В качестве измерительных устройств предлагается использовать датчики ускорения и температуры.

Ключевые слова: контактная сеть, натяжение проводов, частота колебаний, система мониторинга и диагностики.

Elena A. Butenko, Alexandr N. Smerdin, Anton S. Golubkov

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

IMPROVING THE EFFICIENCY EXPLOITATION OF THE CURRENT COLLECTION SYSTEM BY ONLINE MONITORING OF THE BASIC PARAMETERS OF THE CONTACT NETWORK

The article describes a method for increasing the efficiency of the current collection system through online monitoring of the network. This method makes it possible to determine a number of parameters by the vibrations of the wires, by which the condition of the overhead catenary can be estimated. It is proposed to use an acceleration and temperature sensors as measuring devices.

Keywords: contact network, wire tension, vibration frequency, monitoring and diagnostic system.

Согласно «Стратегии развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 года» предусмотрено повышение качества технического обслуживания контактной сети [1, 2] и увеличение скорости движения. В данных условиях одну из важнейших ролей играет система мониторинга и диагностики контактной сети. Контактная сеть должна обеспечивать надежный и качественный токосъем во время эксплуатации, поэтому необходимо непрерывно контролировать ее работоспособность. В результате воздействия со стороны электроподвижного состава, природных факторов и токовых нагрузок, заданные проектные показатели регулировки выходят за допустимые значения, что приводит к появлению отказов.

На сегодняшний день, имеющиеся методы и подходы диагностики не обеспечивают требуемого снижения числа нарушений в работе системы токосъема. Таким образом, актуальной задачей является широкое применение устройств онлайн мониторинга и диагностики контактной сети, которые будут обладать достаточной точностью измерения в различных климатических условиях, способных функционировать под высоким напряжением в автономном режиме длительное время.

Контактная сеть имеет ряд конструктивных особенностей, благодаря которым имеется возможность контролировать в онлайн режиме параметры её работы затруднена. Так как провода и тросы участвуют во взаимодействии с токоприемником электроподвижного состава, дополнительные устройства закрепленные на них, должны быть малогабаритными (рисунок 1).

Одним из важнейших параметров работы контактной сети является натяжение контактного провода, так как от натяжения зависит скорость распространения волны, высотное положение проводов, жесткость и ветроустойчивость контактной подвески. Контроль натяжения контактного провода в реальном масштабе времени представляет собой актуальную задачу, решение которой позволит повысить работоспособность всей системы токосъема.

Для определения параметров контактной сети предлагается использовать метод, основанный на измерении частоты затухающих колебаний контактных проводов в поперечной плоскости. Частотный спектр колебаний несет в себе информацию о наличии изгибной жесткости, износа, гололеда. Изменения этих свойств приводят к искажению «цифрового отпечатка».

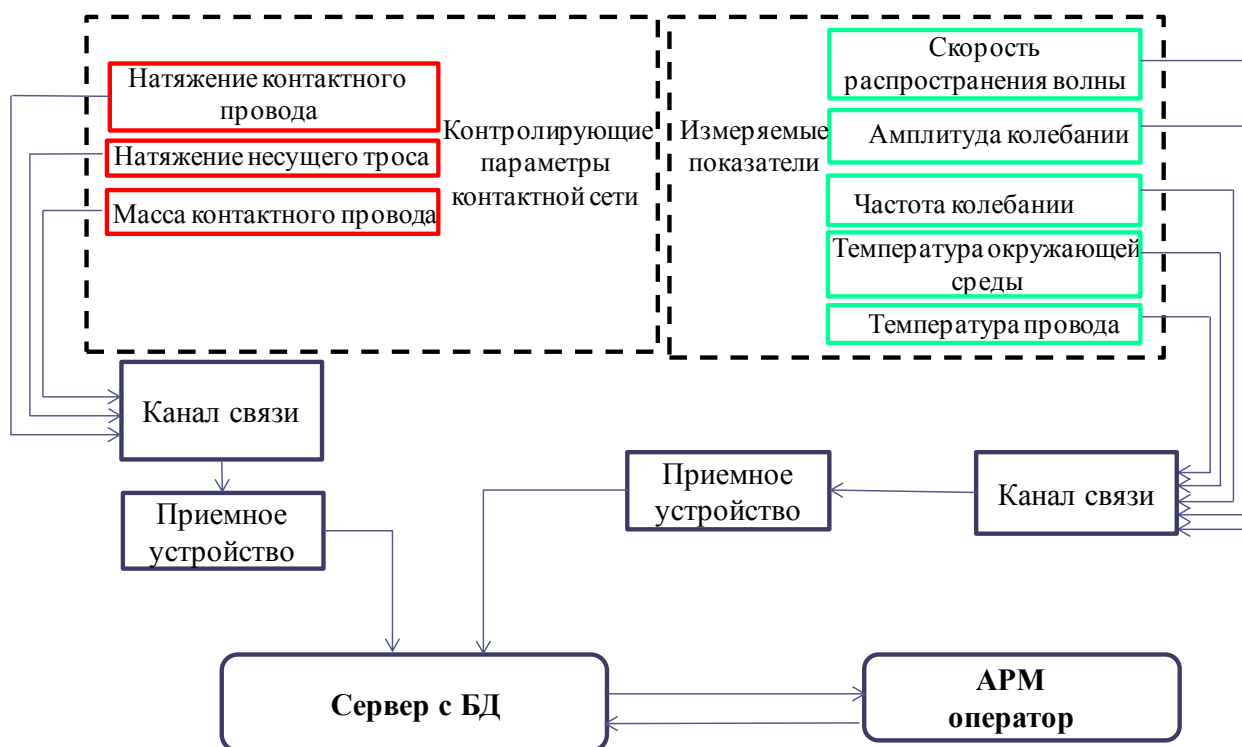
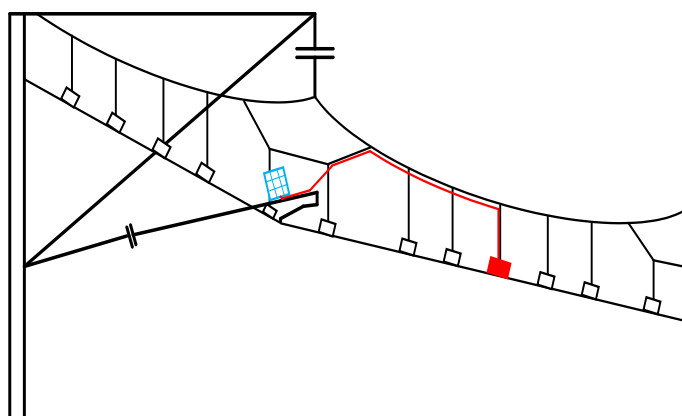


Рисунок 1 – Блок-схема контролируемых параметров и измеряемых показателей контактной сети

В качестве измерительных устройств используются датчик ускорения, размещенный в теле струнового зажима в середине пролета и датчик температуры [3-5]. Датчик ускорения и температуры получают энергию от блока питания с солнечной батареей, установленной на основном стержне фиксаторе (рисунок 2).



а



б

Рисунок 2 – Измерительный комплекс устройств:

- а) датчик частоты колебаний, встроенный в струновой зажим;
- б) схема размещения датчиков в пролете контактной сети

При каждом проходе токоприемника электроподвижного состава поперечные колебания в середине пролета образуют «цифровой отпечаток» колебательного звена, параметры которого зависят от длины пролета, упругости контактных проводов и их массы [3].

$$\omega_r = \sqrt{\frac{\pi^4 \cdot r^4 \cdot E_{к.п} \cdot J_{к.п}}{m_{кп} \cdot l^4} \cdot \left(1 + \frac{K \cdot l^2}{\pi^2 \cdot r^2 \cdot E_{к.п} \cdot J_{к.п}}\right)}. \quad (1)$$

где $E_{кп}$ – модуль упругости материала контактного провода сплошного сечения, Н·м²;

$J_{кп}$ – момент инерции поперечного сечения контактного провода относительно главной центральной оси, м⁴.

K – натяжение контактного провода, Н;

$m_{кп}$ – погонная масса контактного провода, кг/м;

r – номер гармоники;

l – длина пролета, м.

Полученные значения колебаний позволяют в реальном времени обнаружить выпадение гололеда, износ контактного провода, несоответствие натяжению в проводах номинального значения, а также определить предельные режимы и рекомендуемые уровни тяговой нагрузки без ущерба работы движения поездов.

При изменении частоты колебаний контактной подвески система онлайн мониторинга уточняет, за счет чего произошло это варьирование: вследствие изменения температуры, погонной массы, либо натяжения. В зависимости от других показаний датчиков принимается соответствующая гипотеза, на основании которой делается вывод, например о том, что на контактной сети появились гололедные образования. Если частота изменяется плавно на протяжении длительного времени – это свидетельствует о росте износа. Если изменение частоты сопровождается изменениями температуры, то вероятнее всего ухудшение работы компенсирующих устройств.

На основании совокупности диагностических принципов принимается решение о необходимости управляющих воздействий (профилактика гололеда, техническое обслуживание и т.д.). Если изменение параметров контактной сети

не наблюдаются, и они находятся длительное время в пределах нормы можно увеличить скорость движения от проектного значения.

Благодаря предложенному методу не только повысится эффективность работы системы токосъема, но и появится возможность уточнить прогнозные модели на основе поступающих сведений о нарушениях в работе, а также позволит избежать нерациональных расходов и повысить безопасность движения поездов.

В настоящее время в лаборатории «Конструкции контактных сетей, линий электропередачи и токосъема» им. профессора Михеева» ОмГУПС ведутся работы по созданию программного обеспечения для использования онлайн мониторинга и диагностики контактной сети.

Список литературы

1. Программа организации скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения в Российской Федерации // Открытое акционерное общество «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД») : сайт. – URL: http://www.hsrail.ru/download_files/programma_2018_04_04.pdf (дата обращения: 11.11.2020). – Текст : электронный.
2. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 г. («Белая книга» ОАО «РЖД») – Москва : ОАО «РЖД», 2011. – 340 с. – Текст : непосредственный.
3. Смердин, А. Н. Применение моделей поперечных колебаний растянутого стержня для расчета натяжений проводов контактной сети / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019 – №4 (40). – С. 25-32.
4. Duan, F. A siamese network-based non-contact measurement method for Railway catenary uplift trained in a free vibration test / F. Duan, Z. Liu, D. Zhai, A. Ronnquist // Sensors. – 2020. – Vol. 20 (14). – PP.1-16.
5. Смердин, А. Н. Совершенствование программно-аппаратного комплекса мониторинга и диагностики контактной сети / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко, Г. Р. Ермачков. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья – 2020. – №5 (83). – С. 23-28.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бутенко Елена Александровна

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск 644046,

Российская Федерация.

Аспирантка кафедры «Электроснабжение
железнодорожного транспорта» ОмГУПС.

Тел.: +7 (904) 0760095, +7 (913) 6004786.

E-mail: butenkoelena1994@gmail.com.

Смердин Александр Николаевич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск 644046,

Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры
«Электроснабжение железнодорожного
транспорта» ОмГУПС.

Тел.: +7 (904) 5884048.

E-mail: alexandr.smerdin@omgups.com.

Голубков Антон Сергеевич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электроснабжение железнодорожного
транспорта» ОмГУПС.

E-mail: anton.golubkov@omgups.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Butenko Elena Alexandrovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Post-graduate student of the department
«Electricity supply of railway transport»
OSTU.

Phone: +7 (904)0760095, +7 (913)6004786.

E-mail: butenkoelena1994@gmail.com.

Smerdin Alexandr Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, professor of the
department «Electricity supply of railway
transport» OSTU.

Phone: +7 (904) 5884048.

E-mail: alexandr.smerdin@omgups.com.

Golubkov Anton Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, associate
professor of the department «Electricity
supply of railway transport» OSTU.

E-mail: anton.golubkov@omgups.com.

П. В. Алексеева

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

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ОТ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ

В статье приведен краткий анализ существующих методов и технических средств защиты подземных металлических сооружений от блуждающих токов. Определены достоинства и недостатки действующих методов защиты. Полученная в результате анализа информация может быть использована при совершенствовании методов и средств защиты заземляющих устройств от блуждающих токов.

Ключевые слова: блуждающий ток, металлическое подземное сооружение, дренажная установка, коррозия.

Polina V. Alekseeva

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

ANALYSIS OF METHODS AND TECHNICAL EQUIPMENT FOR PROTECTING UNDERGROUND METAL STRUCTURES FROM STANDING CURRENTS

The article provides a brief analysis of methods and technical means of protecting underground metal structures from stray currents. The advantages and disadvantages of the existing methods of protection are determined. The information obtained as a result of the analysis can be used to improve the methods and means of grounding devices against stray currents.

Keywords: stray current, metal underground structure, drainage installation, corrosion.

В железнодорожных системах постоянного тока рельсы используются для передачи тягового тока. Это снижает затраты на разработку электрифицированных линий, поскольку это исключает необходимость установки отдельно стоящих токопроводящих проводников. Несмотря на это,

значительная часть обратного тока способна вытекать в грунт на участках с плохой изоляцией. Размер тока утечки зависит от множества факторов: проводимости обратного рельса по сравнению с землей, качеством изоляции между путями и землей, и от тока поезда, который в свою очередь зависит от условий эксплуатации поезда (ускорение, торможение и тд). Главной причиной разрушения подземных металлических конструкций является вызванная блуждающими токами электрохимическая коррозия. Из-за постоянно возрастающих объемов потребляемой энергии, увеличения количества тяговых подстанций (ТП), в том числе и на железной дороге, наблюдается снижение срока службы подземных металлических сооружений в течение последних 10-20 лет. Несмотря на существующие методы защиты от коррозии, разрушение происходит и по сей день. В статье будут рассмотрены известные методы защиты подземных металлических сооружений от блуждающих токов.

Блуждающий ток возникает между двумя любыми точками грунта, имеющими разный потенциал. Ток «блуждая», пытаясь найти грунт с наименьшим электрическим сопротивлением, охватывает сложным путем толщу грунта. И если на пути блуждающего тока оказывается металлическое подземное сооружение, электрическое сопротивление которого значительно меньше, чем у грунта, то оно непременно становится проводником электричества. Участок трубопровода, по которому будет протекать ток, наиболее подвержен коррозии. Согласно закону Фарадея, скорость электрохимической реакции находится в прямой зависимости от тока, протекающего между анодом и катодом. Это значит, что на скорость коррозии уложенной в грунте металлической трубы будет влиять электрическое сопротивление почвы и сложная природа процессов, протекающих в катодной и анодной зоне. Катодной называется зона, через которую ток попадает из земли в металлическую конструкцию. Катодная зона не подвергается коррозии. Место, где ток утекает из подземного сооружения, является анодной зоной. Именно здесь находится область коррозии металла. На рисунке 1 представлена схема коррозии блуждающими токами.

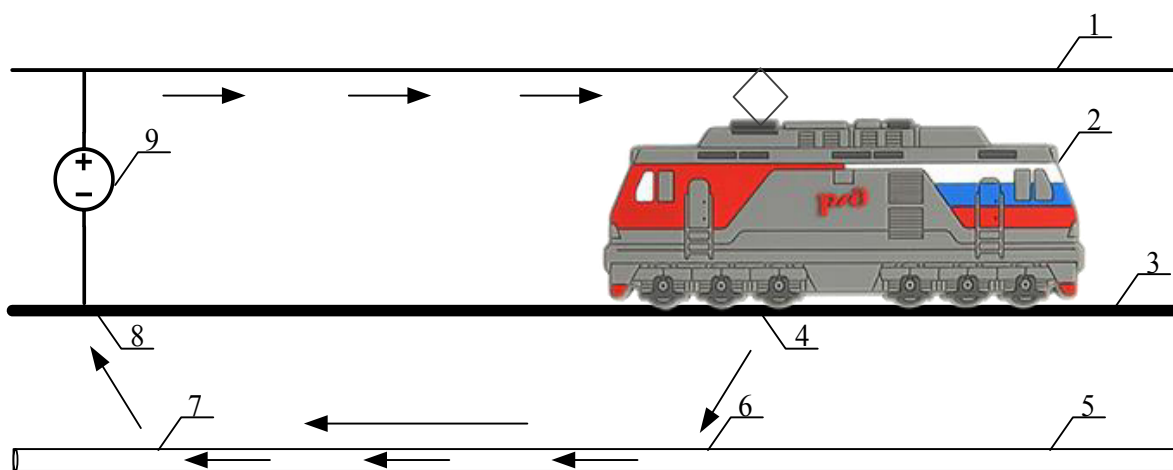


Рисунок 1 – Схема коррозии блуждающими токами:

1 – контактный провод; 2 – электровоз; 3 – рельс; 4 – анодная зона рельса;
5 – изолированный подземный проводник; 6 – катодная зона проводника; 7 – анодная зона проводника; 8 – катодная зона рельса; 9 – источник тока (ТП)

Известны два основных способа защиты подземных металлических сооружений от блуждающих токов: пассивный и активный. Пассивный, он же первичный, характерен созданием различного рода изолирующих покрытий, продольного электрического секционирования сооружений и прокладки в изолирующей канализации (трубах) [1]. Главной целью пассивного способа защиты является попытка полного исключения попадания блуждающих токов на подземные сооружения. При наличии любого соединения оболочки кабеля или трубопровода с конструкцией, чье заземление осуществляется через рельс, повреждения от коррозии могут образоваться уже через несколько месяцев после ввода в эксплуатацию электротяги. Поэтому основным мероприятием пассивной защиты, предотвращающим непосредственное перетекание тяговых токов с рельсов, считается исключение всех возможных металлических соединений оболочек кабелей и трубопроводов с рельсами через конструкции, заземление которых происходит через рельсы.

Несмотря на широкое распространение мер пассивной защиты, они не исключают попадание блуждающих токов на подземные сооружения. Из-за снижения характеристик изолирующего покрытия, повреждения кабеля во время укладки, транспортировки и других причин, ухудшающих параметры оболочки, создаются условия для протекания в земле блуждающих токов. Задачей активной защиты является создание встречного тока равной, или близкой к равной величине, компенсирующего возникающий блуждающий ток. Также способ

активной защиты подземных сооружений называют катодной поляризацией, то есть защита внешним током, вызывающим смещение потенциала сооружения в отрицательную область [1]. На поверхности металла под действием электрического тока возникает электрохимическая реакция, поэтому данный способ отвода тока является разновидностью электрохимической коррозии.

Известным способом активной защиты является электрический дренаж. Подземное сооружение электрически соединено с тяговыми рельсами источника блуждающих токов, источника ЭДС не требуется. Возникающая в результате работы электрифицированного транспорта разность потенциалов служит источником защитного тока «сооружение-рельс». Исходя из этого электрический дренаж – один из самых простых. Решением проблемы электрокоррозии является снижение потенциала сооружения до нуля.

Ток дренажной защиты состоит из двух частей: тока дренирования и тока катодной защиты. Током дренирования называется блуждающий ток, создающий анодное состояние подземного сооружения. Ток катодной защиты – дополнительный ток, привлекаемый из земли для достижения катодного состояния подземного сооружения. Катодная поляризация необходима для защиты от почвенной коррозии, поэтому каждый случай рассматривается отдельно и существует отдельный способ защиты – катодная защита. Главное отличие от дренажной защиты: ток защиты создается катодной станцией – специальным источником постоянного тока. Протекторная защита является разновидностью катодной. Её суть заключается в следующем: к защищаемой конструкции присоединяют протектор (более электроотрицательный металл), который, растворяясь в окружающей среде, защищает от разрушения подземное сооружение. После полного растворения протектора или потери контакта с защищаемым металлическим сооружением, протектор подлежит замене. Данный метод почти не используется из-за дороговизны и практической сложности применения.

Благодаря повсеместному распространению нашли применение комбинации из дренажной и катодной защиты: усиленная дренажная защита, дренажно-катодная защита.

Известны различные технические средства защиты подземных металлических сооружений от блуждающих токов. Одним из примеров является устройство, содержащее протектор и диод, подключенный анодом к протектору, а катодом – к защищаемому металлическому сооружению [2].

Недостатком данного устройства является отсутствие в нем контроля разности потенциалов между подземными металлическими сооружениями (ПМС) и протектором, что снижает эффективность протекторной защиты ПМС.

Наибольшее распространение получили следующие типы дренажных установок (ДУ): поляризованная, автоматическая и усиленная.

Поляризованную ДУ настраивают только при пусконаладочных работах на среднее значение дренажного тока, которое обеспечивает защитный потенциал на заданном уровне [3].

В качестве поляризованных дренажных установок известны блок дренажной защиты [4-6], содержащий последовательно соединенные регулировочный резистор, поляризованный элемент, элементы защиты по току и напряжению, блок диодно-резисторный, содержащий подстроечный резистор, набор резисторов и диод. Поскольку в реальных условиях значение потенциала на подземном сооружении и ток дренажа изменяются во времени с учетом исполненного графика движения поездов, в отдельные моменты времени подземное сооружение находится за пределами зоны защитных потенциалов. Кроме того, недостатком таких устройств является потеря энергии из-за рассеивания мощности на резисторах блоков.

Главным отличием автоматической ДУ является способность управлять катодной поляризацией ПМС путем регулирования величины отводимых блуждающих токов от защищаемого сооружения к тяговой рельсовой сети в зависимости от величины потенциала «подземное сооружение – земля» относительно электрода сравнения.

В качестве автоматических дренажных установок известны автоматическое дренажное устройство [7], содержащее блок поляризации, блок преобразования и стабилизации энергии блуждающих токов, блок регулирования тока, неполяризуемый электрод сравнения, блок задания и сравнения защитного потенциала, и автоматическая ДУ [8], содержащая дренажную цепь, электрод сравнения, фильтр низких частот и блок управления. Такие устройства позволяют поддерживать защитный потенциал подземного сооружения в заданных пределах на протяжении всего периода эксплуатации. Однако на участках с низкой интенсивностью движения поездов могут возникать ситуации, когда величины дренажного тока недостаточно для поддержания защитного потенциала, в таком случае защита не обеспечивается на должном уровне. Для устранения данного недостатка применяют усиленные ДУ.

Пока блуждающий ток оказывает негативное влияние на систему электроснабжения железнодорожного транспорта, это становится причиной повреждения металлических структур, расположенных около железнодорожных путей, значительно ускоряя процесс коррозии на них. Коррозия снижает время жизни подземных кабелей и трубопроводов, расположенных рядом. Годовые затраты от коррозии, вызванные блуждающим током, оцениваются экономикой в сотнях миллионов рублей.

На сегодняшний день известные методы защиты позволяют поддерживать защитный потенциал только на двух соседних ПМС. Практика показывает, что система ПМС подразумевает соседство с двух сторон. Это значит, что существует потребность в создании системы защиты, поддерживающей защитный потенциал на заземляющем устройстве и тяговой подстанции для каждой из сторон соседних ПМС.

Список литературы

1. Котельников, А. В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта : монография / А. В. Котельников, В. А. Кандаев. – Москва : УМЦ ЖДТ РФ, 2013. – 552 с. – Текст : непосредственный.
2. Защита подземных металлических сооружений от коррозии : справочник / И. В. Стрижевский, А. Д. Белоголовский, В. И. Дмитриев [и др.]. – Москва : Стройиздат, 1990. – 303 с. – Текст : непосредственный.
3. Глазков, В. И. Защита от коррозии протяженных металлических сооружений : справочник / В. И. Глазков, А. М. Зиневич, В. Г. Котик, К. К. Никольский, И. В. Стрижевский. – Москва : Недра, 1969. – 311 с. – Текст : непосредственный.
4. Патент № 50541 РФ. МПК C23F 13/00. Блок дренажной защиты : 2005120126/22 : заявлено 28.06.2005 : опубликовано 20.01.2006 / Кандаев В. А., Свешникова Н. Ю., Кандаев А. В. (РФ). – Текст : непосредственный.
5. Кандаев, В. А. Автоматическая дренажная установка / В. А. Кандаев, Н. Ю. Свешникова. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения. – 13 с. – Текст : непосредственный. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС, № 6325-жд 01, 2001.
6. Автоматическая дренажная установка / Г. Е. Асеев, В. А. Кандаев, Н. Ю. Свешникова и др. // Электроснабжение, энергоснабжение, электрификация и автоматика предприятий и речных судов: сборник научных трудов. – Новосибирск:

Новосибирская гос. академия водного транспорта, 2001. – С. 102-111. – Текст : непосредственный.

7. Патент № 92661 РФ. МПК C23F 13/00. Автоматическое дренажное устройство для защиты от коррозии подземных металлических сооружений : 2009138119/22 : заявлено 14.10.2009 : опубликовано 27.03.2010 / Запевалов Д. Н. (РФ). – Текст : непосредственный.

8. Патент № 170510 РФ. МПК C23F 13/06. Автоматическая дренажная установка : 2016131255 : заявлено 28.07.2016 : опубликовано. 26.04.2017 / Кандаев В. А., Авдеева К. В., Уткина А. В., Медведева А. А. (РФ). – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Алексеева Полина Владимировна

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение
железнодорожного транспорта» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-42-19.

E-mail: alexeevka@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Alekseeva Polina Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Post-graduate student of the Department of
Power Supply of Railway Transport OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-42-19.

E-mail: alexeevka@mail.ru.

УДК 621.331:621.311

А. В. Горькин, Е. К. Хусаинов

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

г. Омск, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОТКЛОНЕНИЯ ФАКТИЧЕСКОГО ТОКА ОТКЛЮЧЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ОТ ТОКА УСТАВКИ

В статье рассматриваются характеристики срабатывания быстродействующих выключателей типа ВАБ-43 и предлагается способ определения величины отклонения фактического тока их отключения от тока уставки. Сделаны выводы о возможности и целесообразности применения предложенного способа определения величины отклонения фактического тока отключения быстродействующих выключателей от тока уставки для

контроля их технического состояния с помощью средств технической диагностики оборудования тяговых подстанций.

Ключевые слова: быстродействующий выключатель; коэффициент динамичности; скорость нарастания тока; цифровые терминалы защит; эксплуатация; реле-дифференциальный шунт, параметр.

Artiom V. Gorkin, Yermek K. Khusainov

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

DETERMINATION OF THE VALUE OF DEVELOPMENT OF THE ACTUAL CURRENT OF THE DISABLE HIGH-SPEED CIRCUIT BREAKERS FROM CURRENT SETPOINT

The article discusses the response characteristics of high-speed VAB-43 switches and proposes a method for determining the deviation of the actual current to disconnect them from the set current. Conclusions about the possibility and feasibility of applying the proposed method for determining the deviation of the actual current off the high-speed switches from the current setpoint to control their technical condition using the means of technical diagnostics equipment traction substations.

Keywords: high-speed switch; dynamism coefficient; speed of increase of current; digital terminals of protection; operation; the relay - the differential shunt, parameter.

В настоящее время на тяговых подстанциях, оборудованных цифровыми терминалами защит фидеров контактной сети ЦЗАФ-3,3/ИнТер-3,3 (далее – ЦТ), ремонт и техническое обслуживание быстродействующих выключателей постоянного тока (далее – выключателей) регламентируется следующими техническими указаниями: «О порядке эксплуатации тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования» № ЦЭТ-2 (П-02/04) от 30.03.2004 [1]; «О внесении изменений в порядок эксплуатации тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования» № ЦЭТ-2/7 от 26.02.2008 [2]; СТО РЖД 11.010-2013 «Электроустановки систем железнодорожного электроснабжения. Номенклатура физических величин, подлежащих контролю при постоянном техническом диагностировании» [3] и распоряжением от от 15 августа 2018 г. N 1825/р «Об утверждении изменения № 1 к СТО РЖД 11.010-2013» [4].

В соответствии с [1, 2], диагностике и контролю подлежат следующие семь параметров быстродействующих выключателей (БВ):

- 1) механический ресурс;
- 2) коммутационный ресурс по току;
- 3) коммутационный ресурс по суммарной коммутируемой энергии;
- 4) время гашения дуги;
- 5) величина отклонения фактического тока отключения выключателя от тока уставки;
- 6) недовключенное положение выключателя;
- 7) неодновременность срабатывания последовательно соединенных выключателей.

А в соответствии с [3, 4], диагностике и контролю подлежат только первые четыре параметра из перечисленных.

Однако в действительности контролируются только два параметра: коммутационный ресурс по току – 3000 кА суммарного отключенного тока и механический ресурс – 80 отключений для всех типов быстродействующих выключателей [5].

В работах [6 – 9] подробно рассмотрены такие параметры, и их критерии, как: механический ресурс, коммутационный ресурс по току, время гашения дуги, недовключенное положение выключателя и неодновременность срабатывания последовательно соединенных выключателей. Таким образом, существует необходимость в разработке и обосновании критериев только для двух параметров: коммутационного ресурса по суммарной коммутируемой энергии и величины отклонения фактического тока отключения выключателя от тока его уставки. И если коммутационный ресурс по суммарной коммутируемой энергии является параметром, контроль которого не является особо необходимым, при условии оценки технического состояния БВ по коммутационному ресурсу по току и времени гашения дуги в соответствии с [5 – 9]. То величина отклонения фактического тока отключения выключателя от тока его уставки является, несмотря на требования [3, 4] достаточно важным параметром, так как в эксплуатации существует проблема самопроизвольного изменения уставки максимально-импульсной защиты (МИЗ) у выключателей типа ВАБ-43 и БВ с применением реле-дифференциального шунта (РДШ), например ВАБ-49.

Уставка МИЗ может измениться как в большую, так и в меньшую сторону из-за особенностей конструкции индуктивного шунта. Численно величина отклонения от уставки может достигать значений до ± 400 А. Выключатели с РДШ в этом плане значительно надежнее. Больших отклонений уставки МИЗ при эксплуатации РДШ не отмечалось. Однако, самопроизвольное изменение уставки РДШ, менее значительное (обычно на величину не более 50 – 100 А), чем в рассмотренном случае, возможно и по другим причинам: изменение уровня напряжения держащей катушки, значительное отличие температурного режима при выставлении уставки от условий эксплуатации.

Также проблемы с точной настройкой уставок МИЗ могут возникать при настройке БВ и РДШ. Уставка МИЗ для БВ, как с индуктивным шунтом, так и с РДШ, зачастую выставляется при прогрузке выключателей прямым током с помощью прогрузочного аппарата ПРУС. При этом итоговый ток в цепи БВ может отличаться от значений зафиксированным прогрузочным аппаратом из-за неправильного расположения силовых кабелей относительно индуктивного шунта или РДШ. Это объясняется тем, что электромагнитные поля, создаваемые силовыми кабелями при протекании по ним тока могут компенсировать (или увеличивать) его значения в цепи выключателя. Для постов секционирования и пунктов параллельного соединения РДШ выключателей нередко настраивается, с использованием ПРУС, в ремонтных мастерских подстанций и потом транспортируется к месту установки. Неоднократно было отмечено, что в процессе перевозки возможно изменение уставки МИЗ РДШ из-за особенностей его конструкции. Таким образом, изначально уставка МИЗ может отличаться от расчетной, что может привести как к пережогу/отжигу контактного провода, так и к излишним отключениям выключателей.

В настоящее время контролировать величину отклонения фактического тока отключения выключателя от тока его уставки возможно только для устройств ЦТ, что больше будет соответствовать самодиагностике этих терминалов защит. Для контроля уставки МИЗ необходимо выработать дополнительные критерии и алгоритм работы. Это объясняется тем, что МИЗ – это динамическая защита, т.е. ее уставка изменяется в зависимости от скорости нарастания тока в тяговой сети.

Для определения способа контроля величины отклонения фактического тока отключения выключателя от тока его уставки необходимо рассмотреть

защитные характеристики БВ, которые будут определяться параметрами индуктивного шунта и РДШ [10, 11].

Рассмотрим предлагаемый способ на примере выключателей типа ВАБ-43. На рисунке 1 приведены защитные характеристики МИЗ для этого типа выключателей [10, 11] при разных значениях постоянной времени сети T_c .

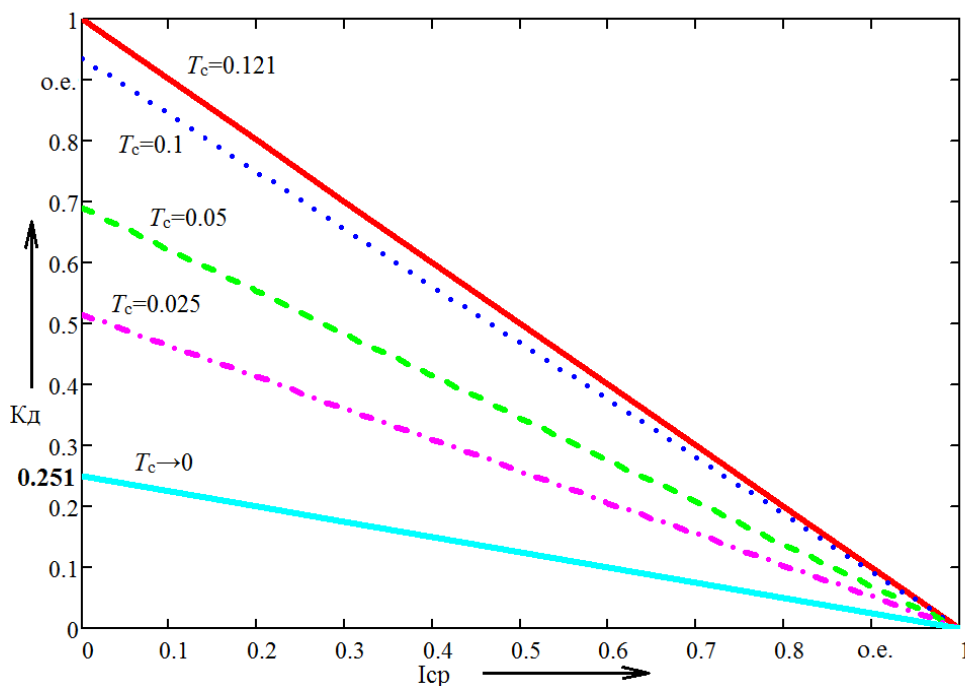


Рисунок 1 – Характеристики срабатывания индуктивного шунта БВ типа ВАБ-43

Важным параметром является коэффициент динамичности K_d — это отношение динамической уставки ($I_{ду}$) БВ к статической (I_{cy} [10, 11]):

$$K_d = \frac{I_{ду}}{I_{cy}}. \quad (1)$$

Для определения коэффициента динамичности необходимо будет знать собственное время отключения выключателя.

По рисунку 1 возможно определение коэффициента динамичности при различных установившихся значениях тока в сети, предшествующих отключению БВ, которые будут откладываться по оси абсцисс. Например, при значении тока в тяговой сети равном половине от значения тока уставки МИЗ выключателя и при постоянной времени сети равной 0,05 с, срабатывание БВ произойдет с коэффициентом динамичности $K_d = 0,345$ (рисунок 2).

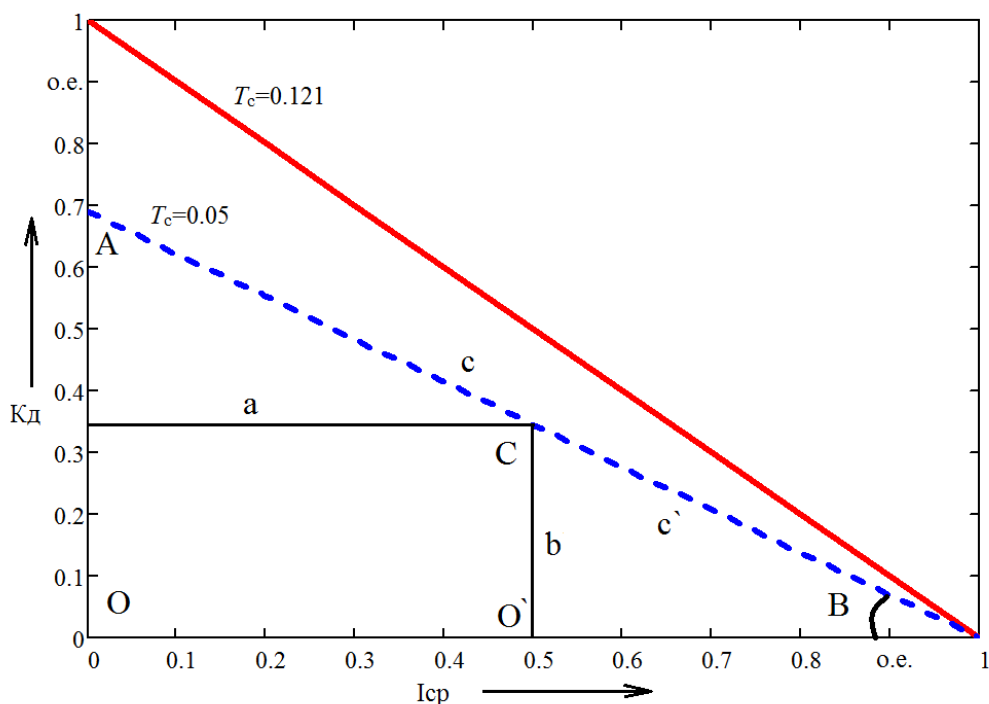


Рисунок 2 – Характеристики срабатывания индуктивного шунта БВ типа ВАБ-43

Покажем возможность определения величины отклонения фактического тока отключения выключателя от тока его уставки при известных характеристиках срабатывания выключателя. Предлагаемый алгоритм будет определяться геометрическими построениями для прямоугольного треугольника, образованного непосредственно характеристикой срабатывания БВ и осями K_d и $I_{ср}$. Для рассматриваемого ниже примера данный треугольник будет обозначен вершинами «А», «В» и «О».

Предположим, что срабатывание БВ произошло при установившемся токе в тяговой сети равной половине значения тока уставки МИЗ выключателя и при постоянной времени сети равной 0,05 с. Коэффициентом динамичности K_d в этом случае будет равен 0,345 и будет равняться отрезку «b» (рисунок 2). Для определения значения K_d при такой же уставке выключателя, но при нулевом установившемся токе в тяговой сети и постоянной времени сети равной нулю необходимо предварительно определить длину отрезка характеристики срабатывания «с'» и величину угла при вершине «В».

$$c' = \sqrt{b^2 + (1-a)^2}, \quad (2)$$

$$B = \arccos\left(\frac{1-a}{c'}\right), \quad (3)$$

$$K_{\text{д}} = \frac{1}{\text{ctg}(B)}, \quad (4)$$

Далее сделаем предположение, что уставка МИЗ самопроизвольно изменилась и БВ сработал при другом значении $K_{\text{д}}$. Для определения нового значения коэффициента динамичности $K_{\text{д}}^*$ воспользуемся формулами (2 – 4).

Величина отклонения тока уставки будет определяться формулой:

$$\Delta I_{\text{y}} = I_{\text{cy}} \cdot (K_{\text{д}}^* - K_{\text{д}}), \quad (5)$$

где I_{cy} – ток статической уставки БВ, установленной изначально.

Причем, отрицательное значение, рассчитанное по формуле (5), будет характеризовать уменьшение величины уставки относительно начальной, а положительное, соответственно, об увеличении.

Отклонение тока уставки БВ от значения тока срабатывания в процентах будет определяться по формуле:

$$\Delta I_{\text{y}\%} = 100 - \frac{I_{\text{cy}} - \Delta I_{\text{y}}}{I_{\text{cy}}} \cdot 100, \quad (6)$$

Таким образом, при достижении значения отклонения тока уставки БВ от величины тока его срабатывания более 10% [1], необходимо вывести выключатель в ремонт для корректировки уставки МИЗ.

Возможно определение $K_{\text{д}}$ без использования формул (2–4), по характеристикам, приведенным на рисунке 1. Однако при данном подходе возникает вопрос дискретности значений $K_{\text{д}}$, а значит и точности вычислений.

Основные выводы:

1. Возможно определение величины отклонения фактического тока отключения выключателя от тока его уставки.
2. Для определения этой величины необходимо задать характеристики отключения конкретного типа выключателя, значение тока его уставки МИЗ и собственное время отключения.
3. Собственное время отключения выключателя необходимо задавать для определения коэффициента динамичности, т.к. этот параметр будет отличаться для отдельных БВ.
4. Целесообразность применения предложенного способа определения величины отклонения фактического тока отключения выключателя от тока его уставки обусловлена тем, что в этом случае возможно удаленно и

автоматически, средствами системы технического диагностирования, определять соответствие уставки МИЗ заданному значению. Вследствие этого возрастет надежность тягового электроснабжения и могут значительно сократиться трудозатраты на обслуживание БВ из-за снижения числа излишних отключений.

5. Необходимо разработать алгоритм определения ЦТ постоянной времени в тяговой сети.

6. Возможно определение K_d без использования формул (2 – 4), по характеристикам, приведенным на рисунке 1. Однако при данном подходе возникает вопрос дискретности значений K_d , а значит и точности вычислений. Поэтому необходимо проработать также и этот вариант и сравнить его результаты с материалами настоящей статьи.

7. Предварительно выводы, полученные в настоящей статье, необходимо апробировать в лабораторных условиях и на реальных объектах тяговых подстанций.

Список литературы

1. Техническое указание о порядке эксплуатации тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования : введено техническим указанием ОАО «РЖД» № ЦЭТ-2 (П-02/04) от 30.03.2004. – Текст : непосредственный.

2. Техническое указание о внесении изменений в порядок эксплуатации тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования : введено техническим указанием ОАО «РЖД» № ЦЭТ-2/7 от 26.02.2008. – Текст : непосредственный.

3. СТО РЖД 11.010-2013 Электроустановки систем железнодорожного электроснабжения. Номенклатура физических величин, подлежащих контролю при постоянном техническом диагностировании : утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 24.03.2014 № 734р. – Текст : непосредственный.

4. Об утверждении изменения № 1 к СТО РЖД 11.010-2013 «Электроустановки систем железнодорожного электроснабжения. Номенклатура физических величин, подлежащих контролю при постоянном

техническом диагностировании» : утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 15 августа 2018 г. № 1825/р. – Текст : непосредственный.

5. Горькин, А. В. Диагностика быстродействующих выключателей тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования / А. В. Горькин. – Текст : непосредственный // Метрологическое и нормативное обеспечение качества и безопасности продукции : материалы Всероссийской научно-технической конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 165-171.

6. Горькин, А. В. Обоснование увеличения межремонтных интервалов при эксплуатации быстродействующих выключателей постоянного тока тяговых подстанций, оборудованных системой технической диагностики / А. В. Горькин, А. М. Сапельченко, К. В. Писарев. – Текст : непосредственный // Электроснабжение железных дорог : межвузовский тематический сборник научных трудов ; под редакцией О. А. Сидорова / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 6-10.

7. Горькин, А. В. Оценка состояния дугогасительных контактов быстродействующих выключателей тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования / А. В. Горькин. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научно-практической конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 85-90.

8. Горькин, А. В. Оценка технического состояния быстродействующих выключателей тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования / А. В. Горькин. – Текст : непосредственный // Вестник РГУПС. – 2017. – №2 (66). – С. 98-103.

9. Горькин, А. В. Оценка остаточного ресурса быстродействующих выключателей на тяговых подстанциях постоянного тока / А. В. Горькин. – Текст : непосредственный // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : материалы IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2017. – С. 223-227.

10. Пупынин, В. Н. Полная теория работы и характеристика параллельных индуктивных шунтов быстродействующих выключателей типов ВАБ-2, АБ-2\3, АБ-2\4 и реле дифференциальных шунтов выключателей ВАБ-28 / В. Н. Пупынин. – Текст : непосредственный // Труды МИИТа. – 1965. –Выпуск 213. – С. 61-86.

11. Такарлыкова, А. С. Изолирующий промежуток тяговой сети постоянного тока для условий скоростного и тяжеловесного движения : специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» дис. канд. тех. наук: 05.09.01 / Такарлыкова Алла Сергеевна ; Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ). – Москва, 2009. – 161 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горькин Артём Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» ОмГУПС.

Телефон: 8-960-991-23-56.

E-mail: wert_81_06_28@mail.ru.

Хусаинов Ермек Кенжебулатович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-27-61.

E-mail: husainov0908@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gor'kin Artyom Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Postgraduate chair «Rolling stock of electric Railways» OSTU.

Phone: 8-960-991-23-56.

E-mail: wert_81_06_28@mail.ru.

Khusainov Yermek Kenzhebulatovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Postgraduate student of the department "Electricity supply of railway transport" OSTU.

Phone: (3812) 44-27-61.

E-mail: husainov0908@rambler.ru

Ю. В. Москалев, С. А. Маркаускас

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

ЛИТИЙ-ТИТАНАТНЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ КАК НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ АВТОНОМНЫХ ЛОКОМОТИВОВ

В статье рассмотрены различные типы накопителей энергии, которые используются на борту автономных локомотивов железных дорог. Накопители энергии обеспечивают питание энергией потребителей при отсутствии основного питающего напряжения, а также питание стартер-генератора для пуска дизеля тепловоза. Для повышения энергетической эффективности магистральных и маневровых тепловозов на их борту размещают емкие накопители энергии, позволяющие оптимизировать режим работы дизеля и элементов электрической передачи. В статье выполнено сравнение различных типов накопителей энергии. Литий-титанатные аккумуляторы имеют хорошие массогабаритные и необходимые технические показатели, поэтому они могут быть использованы на борту автономных локомотивов для пуска дизеля и в качестве емких накопителей гибридных тепловозов. Приведены результаты экспериментальных исследований зарядных и разрядных характеристик литий-титанатного аккумулятора типа LTO66160.

Ключевые слова: автономный локомотив, литий-титанатный аккумулятор, энергетическая эффективность, зарядные и разрядные характеристики.

Yuri V. Moskalev, Stanislav A. Markauskas

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

LITHIUM-TITANATE BATTERIES AS ENERGY STORAGE FOR AUTONOMOUS LOCOMOTIVES

The article discusses various types of energy storage devices that are used on board autonomous railway locomotives. Energy storage devices provide power to consumers in the absence of the main supply voltage, as well as power to the starter generator for starting the diesel locomotive. To increase the energy efficiency of mainline and shunting locomotives, capacious energy storage devices are placed on their board, which allow optimizing the operation of diesel and elements of electric transmission. The article compares different types of energy storage

devices. Lithium-titanate batteries have good mass-size and necessary technical characteristics, so they can be used on Board Autonomous locomotives for starting diesel engines and as capacious storage devices for hybrid locomotives. The results of experimental studies of the charging and discharge characteristics of a lithium-titanate battery of the LTO66160 type are presented.

Keywords: autonomous locomotive, lithium-titanate battery, energy efficiency, charging and discharge characteristics.

В настоящее время на борту автономных локомотивов используются различные накопители энергии:

1) кислотные и щелочные аккумуляторные батареи, которые предназначены для питания энергией тягового генератора при пуске дизеля, цепей управления, защиты, освещения и автоматической локомотивной сигнализации при отсутствии основного питающего напряжения [1].

2) электрохимические конденсаторы (суперконденсаторы), такие накопители энергии способны обеспечить высокую импульсную мощность (при небольшой энергоемкости) при пуске тепловозного дизеля. Поэтому при подключении суперконденсаторов параллельно заряженной батарее аккумуляторов обеспечивается увеличение тока стартера, частоты пускового прокручивания дизельного двигателя при одновременном снижении на 30-50 % ударного тока аккумуляторной батареи и времени пуска двигателя, это увеличивает срок службы батареи в 1,5-3 раза [1].

3) литий-железо-фосфатные аккумуляторы. Такие емкие накопители подключаются через полупроводниковые преобразователи к силовой цепи и позволяют значительно сократить расход топлива автономных локомотивов, повысить надежность элементов электрической передачи локомотива и дизельного двигателя за счет оптимизации режимов их работы [2-4].

С использованием рисунка 1 можно выполнить сравнение различных типов накопителей энергии по энергоемкости и мощности [5].

Как можно видеть на рисунке 1, одновременно высокими показателями по мощности и энергоемкости обладают литий-железо-фосфатные и литий-титанатные аккумуляторы. По этой причине такие накопители энергии используют в электромобилях и гибридных автомобилях.

Для автономных локомотивов также важными показателями накопителей являются массогабаритные показатели, поэтому литий-титанатные

аккумуляторы имеют необходимые технические показатели и могут быть использованы на борту тепловозов.

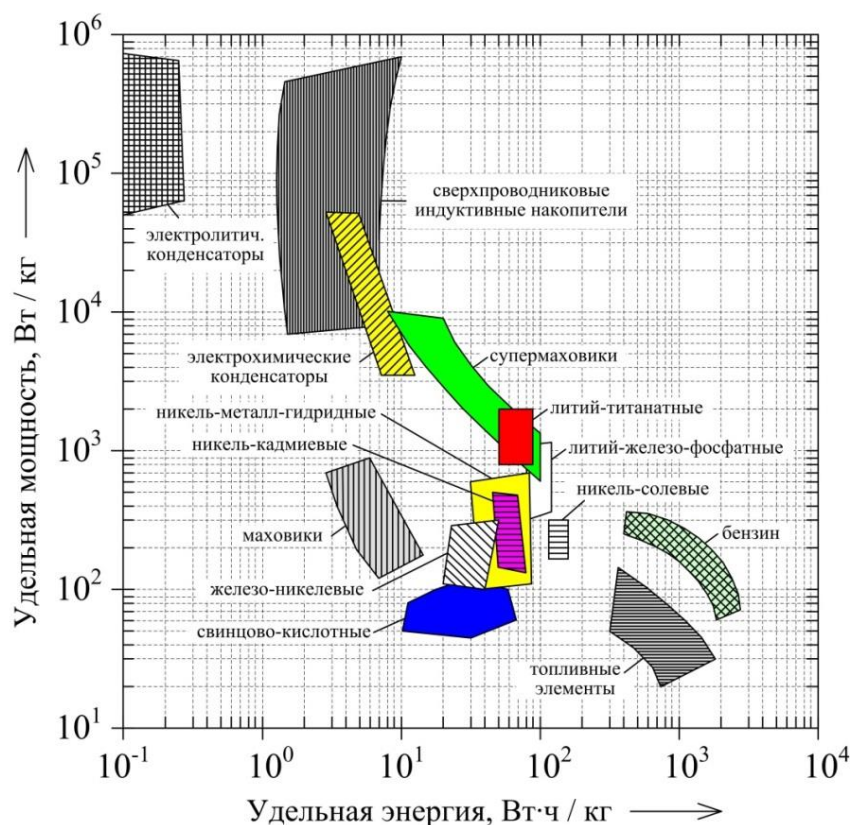


Рисунок 1 – Сравнение различных типов накопителей энергии

Основные технические параметры литий-титанатных аккумуляторов различных производителей приведены в таблице 1 ($I_{\text{ном}}$ – номинальный ток).

В качестве объекта исследования рассмотрен литий-титанатный аккумулятор типа *LTO 16160*. Номинальные параметры такого аккумулятора: напряжение – 2,3 В; емкость – 30 А·ч; сила тока – 30 А; мощность – 69 Вт; энергоемкость – 69 Вт·ч [7].

Для экспериментального исследования аккумулятора была собрана схема, приведенная на рисунке 2 [9].

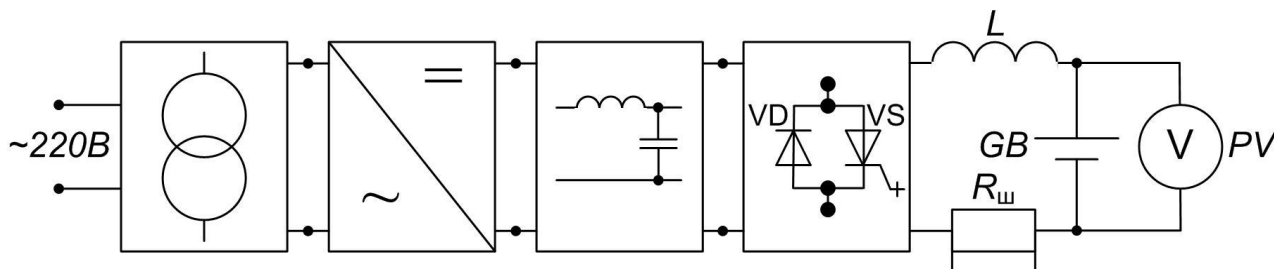


Рисунок 2 – Структурная схема устройства заряда-разряда

Таблица 1

Основные технические параметры *LTO*-аккумуляторов

Показатель	Производитель		
	<i>Altairnano</i> [6] (США)	<i>Yinlong</i> [7] (КНР)	КБ «Энергия» [8] (Россия)
Номинальное напряжение, В	2,22	2,3	2,3 – 2,4
Номинальная емкость, А·ч	65	40	20
Стандартный ток длительного заряда / разряда, А	70	40	20
Максимальный ток длительного заряда / разряда, А	500	400	100
Импульс тока заряда / разряда (10 секунд), А	900	–	400
Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг	80	77	96
Удельная мощность (заряд / разряд), Вт/кг	2530 / 1290	–	1800
Внутреннее сопротивление, мОм	< 0,38	< 0,5	< 1,75
Количество циклов заряда / разряда при $2I_{ном}$, 100% глубина разряда, при 25°C	25 000	30 000	16 000
Рабочий диапазон температур, °C	–50 – +65	–50 – +60	–40 – +55
Масса ячейки, кг	1,81	1,2	0,5

Устройство позволяет обеспечивать необходимый для испытания аккумулятора закон изменения тока заряда-разряда. Это позволяет реализовать необходимые условия работы, которые возможны при эксплуатации.

На рисунке 3 приведены кривые заряда и разряда, полученные в результате эксперимента. Заряд и разряд осуществлялся при постоянном значении тока 30, 60 и 90 А, $U_{акб}$ – напряжение на выводах аккумулятора.

С использованием характеристик можно определить энергию, которую накапливает и отдает аккумулятор:

$$W = \int_0^{\tau} u(t)i(t)dt, \quad (1)$$

где τ – длительность процесса заряда (разряда), мин.

В таблице 2 приведены значения энергии и КПД, рассчитанные с использованием характеристик (см. рисунок 3).

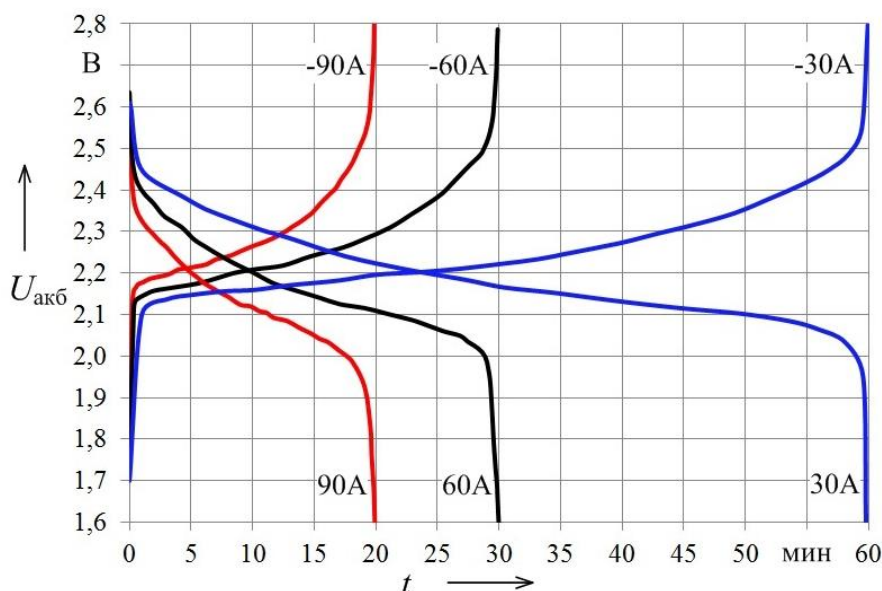


Рисунок 3 – Зарядные и разрядные характеристики литий-титанатного аккумулятора типа *LTO66160* при заряде и разряде постоянным током

Таблица 2

Энергия и КПД ячейки литий-титанатного аккумулятора типа *LTO66160*

Постоянный ток заряда/разряда, А	Энергия, В·ч		Отдача по энергии (КПД), %
	заряд	разряд	
30	67,2	66,1	98,4
60	68,1	64,9	95,4
90	68,7	63,9	92,9

По данным производителей литий-титанатных аккумуляторов [6-8], такие аккумуляторы способны кратковременно (до 10 секунд) выдерживать значительные токи заряда-разряда, поэтому можно использовать сборку из литий-титанатных аккумуляторов для запуска тепловозных дизелей, а также для питания потребителей автономного локомотива при отсутствии основного питающего напряжения. Это позволит уменьшить зарядные и разрядные токи

штатной аккумуляторной батареей не только при пуске дизеля, но и при питании других потребителей. Поэтому мощность и энергоемкость штатной батареи может быть уменьшена, что позволит уменьшить затраты на ее обслуживание. Полная замена штатных кислотных или щелочных аккумуляторов на литий-ионные требует дополнительного технико-экономического обоснования, т.к. литий-ионные аккумуляторы имеют более высокую стоимость в сравнении с кислотными и щелочными аккумуляторами.

Необходимо отметить, что при применении литий-ионных аккумуляторов для обеспечения максимального использования их энергоемкости и мощности, а также для безопасной эксплуатации важное значение имеет устройство балансировки ячеек и управления процессами заряда и разряда.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Литий-титанатные аккумуляторы имеют одновременно высокую удельную мощность и энергоемкость, поэтому у емких накопителей энергии, реализованных с их использованием хорошие массогабаритные показатели, что важно для автономных локомотивов.

2. Выполнено сравнение основных технических показателей литий-титанатных аккумуляторов различных производителей.

3. В результате эксперимента были получены зарядно-разрядные характеристики ячейки литий-титанатного аккумулятора типа *LTO66160* при заряде и разряде постоянным током $I_{\text{ном}}$, $2I_{\text{ном}}$ и $3I_{\text{ном}}$.

4. Рассмотренный аккумулятор запасает и возвращает 90-95 % энергии в диапазоне напряжения от 2,1 до 2,5 В, его КПД составил 98,4 %, 95,4 %, 92,9 % при заряде и разряде постоянным током $I_{\text{ном}}$, $2I_{\text{ном}}$ и $3I_{\text{ном}}$ соответственно.

5. Батарея литий-титанатных аккумуляторов может быть использована для пуска дизелей тепловозов, т.к. при обеспечении необходимых технических показателей такие аккумуляторы дешевле, чем суперконденсаторы.

6. Для замены других накопителей автономных локомотивов на батареи литий-титанатных аккумуляторов с необходимой мощностью и энергоемкостью необходимо отдельные ячейки соединять последовательно и (или) параллельно между собой. Зарядные и разрядные характеристики аккумуляторных ячеек отличаются, и чтобы напряжение каждой ячейки не выходило за допустимые пределы при эксплуатации, необходимы специальные схемы балансировки.

Список литературы

1. Стрекопытов, В. В. Электрические передачи локомотивов : учебник для вузов ж.-д. транспорта / В. В. Стрекопытов, А. В. Грищенко, В. А. Кручек. – Москва : Маршрут, 2003. – 310 с. – Текст : непосредственный.
2. Никипелый, С. О. Повышение эффективности работы тепловозов при применении накопителя энергии в силовой цепи : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Никипелый Сергей Олегович ; Московский государственный университет путей сообщения. – Москва, 2011. – 24 с. – Текст : непосредственный.
3. Проекты гибридных локомотивов // Железные дороги мира. – 2015. – № 4. – С. 56-60. – Текст : непосредственный.
4. Знакомьтесь: ТЭМ5Х – концепт нового гибридного локомотива / И. Л. Селезнев, А. В. Шафрыгин, А. Е. Чекмарев [и др.]. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2019. – № 12. – С. 30-32.
5. Москалев, Ю. В. Экспериментальные исследования процессов заряда-разряда литий-титанатного аккумулятора / Ю. В. Москалев. – Текст : непосредственный // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : материалы IV всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2017. – С. 263-267.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Москалев Юрий Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д.35, г. Омск, 644041, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-18-27.
E-mail: yuriyvm@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Moskalev Yuri Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., 35, Omsk, 644041, the Russian Federation.
Cand. Tech. Sci., the senior lecturer of the department «Electric machines and electrical engineering» OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-18-27.
E-mail: yuriyvm@mail.ru

Маркаускас Станислав Александрович
Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д.35, г. Омск, 644041,
Российская Федерация.
Студент ОмГУПСа, направление
подготовки «Подвижной состав железных
дорог», специализация «Локомотивы».
Тел.: +7-904-320-91-58.
E-mail: salexandrovich97@mail.ru.

Markauskas Stanislav Aleksandrovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., 35, Omsk, 644041,
the Russian Federation.
Student OSTU, training area «Railway rolling
stock», specialization «Locomotives».
Phone: +7-904-320-91-58.
E-mail: salexandrovich97@mail.ru.

УДК 629.423.33

С. М. Утепбергенова, В. В. Томилов, О. А. Сидоров
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
г. Омск, Российская Федерация

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ВЕРХНЕГО УЗЛА ТОКОПРИЕМНИКА МАГИСТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В статье приведена усовершенствованная математическая модель теплового состояния полоза токоприемника электроподвижного состава. Выполнен расчет переходного процесса нагрева полоза.

Ключевые слова: токоприемник, полз, нагрузочная характеристика, моделирование, электроподвижной состав, температура, плотность распределения, зигзаг.

Sandugash M. Utepbergenova, Valery. V. Tomilov, Oleg. A. Sidorov
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

THERMAL STATE MATHEMATICAL MODEL OF THE ELECTRIC ROLLING STOCK PANTOGRAPH HEAD

The article presents an improved mathematical model of the thermal state of the pantograph head. The calculation of the transient heating process of the skid is performed.

Keywords: pantograph, pantograph head, load characteristic, modeling, electric rolling stock, temperature, distribution density, stagger.

Особенностью существующих электрифицированных железных дорог на территории РФ является широкое применение системы тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 3,3 кВ. Продолжительный режим работы электровоза с нагрузкой наибольшим током в течение неограниченного времени при номинальном напряжении на токоприемнике не должен вызывать достижения предельно допустимых температур его электрооборудования. Нагрев полоза токоприемника электроподвижного состава обусловлен электромеханическими процессами в системе «контактный провод – вставка», образующими при движении электроподвижного подвижного состава (ЭПС) сильноточный скользящий контакт. Существующие тенденции повышения скоростей, увеличения массы поездов и применения нового большей мощности ЭПС в системе тягового электроснабжения постоянного тока требуют обеспечения надежности и экономичности системы токосъема при его высоких значениях до 4000 А.

Теоретическими исследованиями в области моделирования распределения токов по токоприемникам занимались коллективы таких ученых как А. Г. Гинзбург, А. М. Маханько и А. В. Чичинадзе, О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. М. Павлов и В. В. Томилов, Д. В. Тартынский [1], М. Н. Емельянова и А. Т. Тибилев, А. В. Паранин и Д. А. Ефимов [2,3].

Математическая модель теплового состояния трехрядного полоза токоприемника в режиме движения, разработанная учеными ВНИИЖТ, не учитывает контактного сопротивления, являющегося источником наибольшего тепла [1].

Трехмерная модель аналогичного полоза УрГУПС учитывает все резистивные сопротивления на пути протекания тягового тока, однако результаты расчетов соответствует установившемуся режиму нагрева. Переходный процесс нагрева методом конечных элементов в течение двадцати минут потребует значительных вычислительных мощностей. Кроме того, вышеуказанные модели соответствуют отечественному полюзу со стальным каркасом открытого типа, нагрузочная способность которого уступает существующей конструкции замкнутого типа из экструдированного алюминия [2,3].

Устранение указанных выше недостатков математических моделей тепловых состояний полоза токоприемника позволит существенно увеличить точность расчетов и понимания взаимосвязи факторов, влияющих на

переходные и установившиеся значения температуры контактных и токопроводящих элементов.

Применение разработанной в ОМГУПСе методики расчета, учитывающей изменение зигзага, позволяет дать оценку тепловому состоянию полоза при различных значениях тягового тока, в том числе сверхнормативных, для любых типов контактных подвесок. В предлагаемой математической модели теплового состояния европолоза на основании данных [1,4] учитывается распределенное воздействие контактных проводов, в том числе двойного, на его верхние площадки [5]. Для каждого элемента полоза 1-37 шириной 30 мм, изображенного на тепловой схеме замещения (рисунок 1а), составляется уравнение теплового баланса, в котором источником тепла является тяговый ток в контактном сопротивлении и транзитный ток во вставке и в каркасе. В тепловой схеме замещения полоза к элементам без тепловыделения относятся рога полоза 36, 37 и воздух 40-76 в полостях каркаса. Теплоотдача между твердыми элементами полоза осуществляется теплопроводностью, в окружающую среду – конвекцией и излучением, между полозом и воздушным пространством в полостях – конвекцией.

Расчет переходного процесса нагрева полоза осуществляется методом эквивалентных тепловых схем замещения. Основными допущениями, принятыми в расчетах, являются следующие: положение контактного провода в плане соответствует равномерному закону распределения, рассчитываются средние температуры всех элементов токоприемника.

С учетом вышеприведенных допущений уравнение теплового баланса для i -го элемента рога без источника тепла:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{-(\lambda_0 + \lambda_{ji}) \cdot T_i + \lambda_0 \cdot T_i + \lambda_{ji} \cdot T_j}{C_i}; \quad (1)$$

для i -го элемента воздуха в полости каркаса:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{-\lambda_{ji} \cdot T_i + \lambda_{ji} \cdot T_j}{C_i}; \quad (2)$$

для i -го токопроводящего элемента полоза с источником тепла:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{-(\lambda_0 + \lambda_{i-1} + \lambda_{i+1}) \cdot T_i + \lambda_0 \cdot T_i + \lambda_{i-1} \cdot T_j + \lambda_{i+1} \cdot T_j + \lambda_n \cdot T_n + P_i}{C_i}, \quad (3)$$

где λ_0 – в частности конвекция и излучение i -ми элементами полоза в окружающую среду.

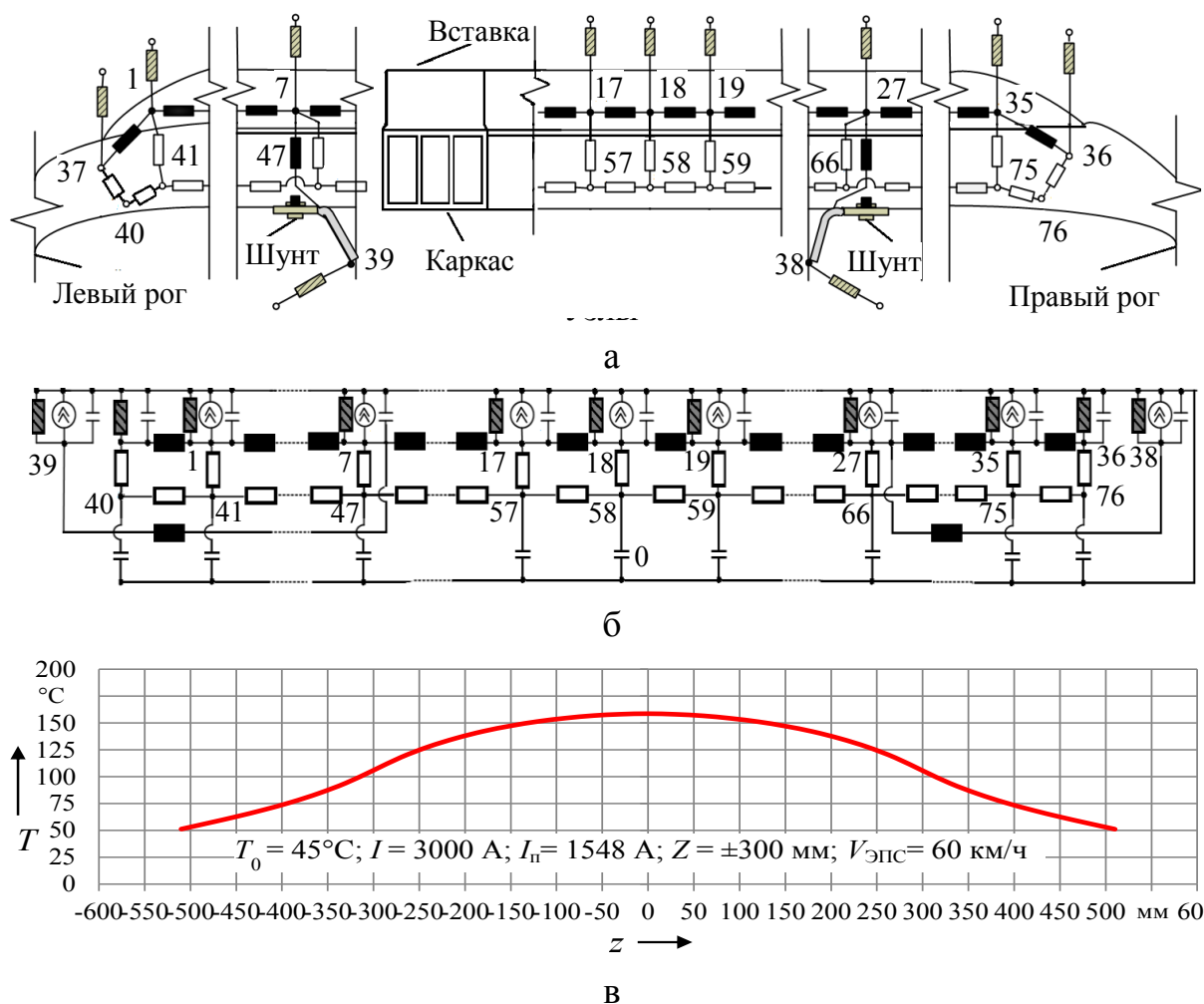


Рисунок 1 – Расчетная схема тепловых процессов типового европолоза токоприемника:

а – тепловая схема замещения полоза; б – электрическая схема замещения тепловых процессов; в – график распределения температуры полоза

Расчетные значения теплоемкости элементов полоза приняты долей от общей ее величины всей конструкции. Теплоемкость полоза, значения прочих основных теплофизические параметров полоза, в том числе теплопроводности, конвекции и излучения, приняты согласно данным приведенным в работе. Результаты расчета приведены для наиболее нагретого полоза, неравномерность распределения тягового тока токоприемника по полездам принята соотношением $I_2 / I_1 = 0,9$. Параметры окружающей среды приняты в расчетах, как неблагоприятные с точки зрения тепловой нагрузки: температура $T_0 = 45^\circ\text{C}$, скорость электроподвижного состава $V_{\text{ЭПС}} = 60 \text{ км/ч}$, скорость ветра $V_B = 0$.

Для схемы полоза на рисунке 2.6а согласно методу расчета, составлена электрическая схема замещения тепловых процессов (рисунок 1б), на основании которой составляется система из 76 уравнений (4).

Решение осуществлено в программе Mathcad методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Иллюстрация графика распределения температуры по полюзу при токе токоприемника $I = 3000$ А приведена на рисунке 1в.

По результатам расчета определена тепловая постоянная полоза токоприемника, равная 13 мин. Максимальное значение температуры полоза располагается в его центре. Для эффективного снижения температуры полоза требуется охлаждения его центральной части. Авторами предложены усовершенствованные конструкции полозов токоприемников, оснащенных системами пассивного охлаждения, как наиболее простыми и эффективными [6,7].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_{01}}{dt} = \frac{-(\lambda_{01} + \lambda_{0137} + \lambda_{0102} + \lambda_{0141}) \cdot T_{01} + \lambda_{01} \cdot T_0 + \lambda_{0137} \cdot T_{37} + \lambda_{0102} \cdot T_{02} + \lambda_{0141} \cdot T_{41} + P_{01}}{C_{01}}; \\ \dots \\ \frac{dT_{07}}{dt} = \frac{-(\lambda_{07} + \lambda_{0607} + \lambda_{0708} + \lambda_{0747} + \lambda_{0739}) \cdot T_{07}}{C_{07}} + \\ + \frac{\lambda_{07} \cdot T_0 + \lambda_{0607} \cdot T_{06} + \lambda_{0708} \cdot T_{08} + \lambda_{0747} \cdot T_{47} + \lambda_{0739} \cdot T_{39} + P_{07}}{C_{07}}; \\ \dots \\ \frac{dT_{36}}{dt} = \frac{-(\lambda_{36} + \lambda_{3536} + \lambda_{3676}) \cdot T_{36} + \lambda_{36} \cdot T_0 + \lambda_{3536} \cdot T_{35} + \lambda_{3676} \cdot T_{76}}{C_{36}}; \\ \dots \\ \frac{dT_{38}}{dt} = \frac{-(\lambda_{38} + \lambda_{2738}) \cdot T_{38} + \lambda_{38} \cdot T_0 + \lambda_{2738} \cdot T_{27} + P_{38}}{C_{38}}; \\ \dots \\ \frac{dT_{76}}{dt} = \frac{-(\lambda_{7576} + \lambda_{3676}) \cdot T_{76} + \lambda_{375768} \cdot T_{75} + \lambda_{3676} \cdot T_{36}}{C_{76}}; \end{array} \right. \quad (4)$$

где T_0 – температура окружающей среды;

T_i – температура i -го элемента полоза;

$C_{01} - C_{35}$ – теплоемкости i -ых элементов полоза;

C_{35}, C_{36} – теплоемкости рогов;

C_{37}, C_{38} – теплоемкости шунтов;

$C_{40} - C_{76}$ – теплоемкости объемов воздуха в элементе каркаса полоза;

$P_{01} - P_{35}$ – мощности нагрева i -го элемента полоза;

$\lambda_{01} - \lambda_{39}$ – конвекция и излучение i -ми элементами полоза в окружающую среду;

$\lambda_{01j} - \lambda_{39j}$ – теплопроводность между рассматриваемым и соседним j -м элементом полоза ($i \neq j \leq 39$);

$\lambda_{3740}, \lambda_{0141} - \lambda_{3676}$ – конвекция между i -ми элементами полоза и j -ми объемами воздуха в каркасе;

$\lambda_{4041} - \lambda_{7576}$ – конвекция между i -ми элементами воздуха в полости каркаса.

Математическая модель позволяет оценить переходный процесс нагрева полоза с учетом его температуры обусловленной предыдущим тяговым режимом. Количество режимов потребления тока соответствуют числу циклов расчета на заданном стационарном участке зигзага.

Достоинством математической модели является возможность применения баз данных ВИКС (СВИКС), содержащих результаты измерения зигзага контактных проводов и контактного нажатия. Тепловой режим полоза может быть рассчитан для любого действующего участка контактной сети с заданными значениями скорости движения электроподвижного состава и величинами потребляемого тока.

Список литературы

1. Тартынский, Д. В. Исследование износа контактных токосъемных элементов на основе моделирования токораспределения в полозе токоприемника / Д. В. Тартынский, М. Н. Емельянова, А. Т. Тибилов. – Текст: непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2015. – № 2. – С. 53-56.

2. Паранин, А. В. Расчет распределения тока в контактном проводе и полозе токоприемника при токосъеме / А. В. Паранин, Д. А. Ефимов. – Текст: непосредственный // Транспорт Урала. – 2009. – № 4 (23). – С. 81-84.

3. Паранин, А. В. Математическое моделирование тепловых процессов при взаимодействии токоприемника и контактного провода / А. В. Паранин. – Текст: непосредственный // Транспорт Урала. – 2009. – № 4 (23). – С. 85-88.

4. Проверка токовой нагрузочной способности токоприемников ТАС 24 и ЛАС 25 / В. М. Павлов, П. В. Попов [и др.] – Текст: непосредственный // Вестник ВЭЛНИИ. – 2015. – № 2 (70). – С. 33-43.

5. ГОСТ 32204-2013. Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия. = Current collectors of railway electric rolling stock. General specifications : Межгосударственный стандарт : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и

сертификации протокол от 27 июня 2013 г. N 57-П : введен впервые : дата введения 2014-06-01 / подготовлен Федеральным государственным унитарным предприятием "Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении" (ВНИИНМАШ). – Москва : Стандартинформ, 2014. – 24 с. Текст: непосредственный.

6. Утепбергенова, С. М. Усовершенствованная математическая модель теплового состояния полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава постоянного тока / С. М. Утепбергенова, В. В. Томилов. – Текст: непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 1 (41). – С. 58-72.

7. Утепбергенова, С. М. Методика расчета теплового состояния полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава с учетом изменения положения контактного провода в плане / С. М. Утепбергенова, В. В. Томилов, О. А. Сидоров. – Текст: непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 4 (40). – С. 43-53.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Утепбергенова Сандугаш Мырзабековна
Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирантка кафедры «Электроснабжение
железнодорожного транспорта» ОмГУПС.
Тел.: +7 (904) 070-09-86.
E-mail: sandee86@mail.ru.

Томилов Валерий Викторович
Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электроснабжение железнодорожного
транспорта» ОмГУПС.
Тел.: +7 (913) 610-62-67.
E-mail: tomilov_omsk@mail.ru.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Utepbergenova Sandugash Myrzabekovna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Graduate student of the Department « Power
supply of railway transport » OSTU.
Phone: +7 (904) 070-09-86.
E-mail: sandee86@mail.ru.

Tomilov Valery Viktorovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the Department «Power supply
of railway transport» OSTU.
Phone: +7 (913) 610-62-67.
E-mail: tomilov_omsk@mail.ru.

Сидоров Олег Алексеевич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Доктор технических наук, заведующий

кафедрой «Электроснабжение

железнодорожного транспорта» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: egt@omgups.ru.

Sidorov Oleg Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, professor, head

of the Department «Power supply of railway

transport» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: egt@omgups.ru.

УДК 338.2

И. В. Губин, В. Д. Куракина, А. И. Изотов, Н. В. Тимина, А. А. Фоминых

Вятский государственный университет (ВятГУ), г. Киров, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА УЗЛОВ СКОЛЬЗЯЩЕГО ТОКОСЪЕМА, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ОТСУТСТВИИ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ

В статье рассказывается об одной из проблем узла скользящего токосъема, работающего при отсутствии токовой нагрузки, а именно о появлении сколов на штатных щетках, обусловленных механическим фактором. Был проведен анализ, обозначены причины появления данной проблемы, а также предложены варианты ее решения.

Ключевые слова: узел скользящего токосъема, смазывающая щетка, электрическая щетка, политуемая пленка, износ, контактные кольца.

Ilya V. Gubin, Valentina D. Kurakina, Anatoly I. Izotov, Natalia V. Timina,

Anton A. Fominykh

Vyatka state University (Vyatgu), Kirov, the Russian Federation

INCREASING THE SERVICE LIFE OF SLIDING CURRENT COLLECTION UNITS OPERATING IN THE ABSENCE OF CURRENT LOAD

The article describes one of the problems of a sliding current collector unit operating in the absence of a current load, namely, the appearance of chips on regular brushes due to a mechanical factor. The analysis was carried out, the reasons for the appearance of this problem were identified, and solutions were proposed.

Keywords: sliding current collector unit, lubricating brush, electric brush, polisher film, wear, contact rings.

В настоящее время несмотря на рост популярности бесколлекторных электрических машин, актуальность узлов скользящего токосъема (УСТ) сохраняется. Они используются в узлах снятия потенциала подвижного состава электропоездов и электровозов, в системах снятия статического электричества синхронных турбо- и гидрогенераторов, а также в случаях работы турбоагрегатов в режиме разбега турбины, когда на штатных щетках (ШЩ) отсутствуют рабочие токи. Такой режим функционирования контактных пар не лишен недостатков, например, в процессе работы данных узлов за счет наличия большого количества механических факторов наблюдаются сколы ШЩ и отбраковка проводится не по величине износа, а из-за недопустимого количества сколов на их поверхности.

В рамках договора о техническом сотрудничестве коллектива кафедры «Электрические машины и аппараты» с ремонтно-локомотивным ДЕПО «Киров – Вятка» (г. Киров), цель которого направлена на повышение надежности узлов трения, автором была проведена серия эксплуатационных испытаний узлов заземления ЗРСЛ электровозов ЧС4т, изображенных на рисунке 1. Данное устройство установлено на торцах осей первой и шестой колесных пар и включает в себя стальное контактное кольцо (1), которое имеет две дорожки. На каждую дорожку установлено два латунных щеткодержателя (2), в которые монтируются сдвоенные электрические щетки (ЭЩ) ЭГ – 61А (3), подпружиненные цилиндрической пружиной.

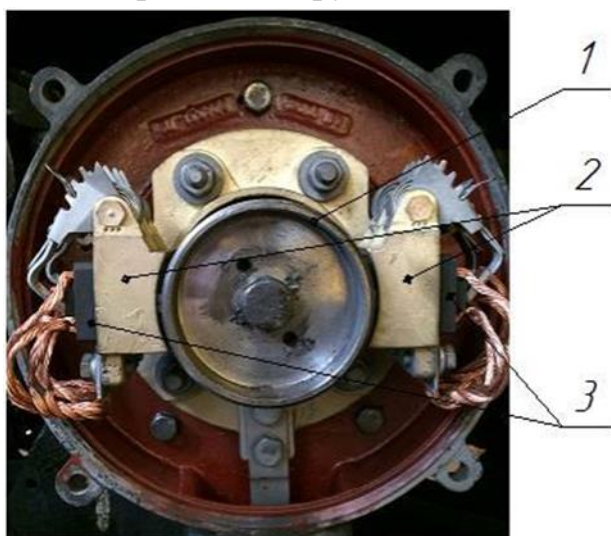


Рисунок 1 – Устройство ЗРСЛ заземления электровоза ЧС4т

При эксплуатации узлов заземления ЗРСЛ у большинства ЭЩ ЭГ – 61А даже на этапе технического обслуживания ТР – 1, которое проводится при 25 000 км пробега или 1,5 месяца эксплуатации, обнаруживаются сколы при сравнительно небольшом износе, изображенные на рисунке 2. Для уменьшения сколов было предложено повысить нажатие на ЭЩ со штатного усилия в 2,6, советующего 26 кПа, до 4,0 кгс, соответствующего 40 кПа.



Рисунок 2 – Состояние ЭЩ узла заземления при штатном усилии 2,6 кгс

На электровоз Чс4т на первую и шестую колёсные пары были установлены новые притертые ЭЩ: на первой паре на все щётки (четыре сдвоенные) было установлено усилие 2,6 кгс, на шестой паре на три сдвоенные ЭЩ – 3,1 кгс, а на четвертую – 4,0. В дальнейшем электровоз был запущен на эксплуатационные испытания. Преодолев 28 000 км электровоз был поставлен на плановый технический ремонт (ТР1). На ТР1 был произведен контроль состояния узлов заземления. Результаты показали, что при увеличении усилия на щетку до 3,1 кгс (рисунок 3) наблюдается снижение числа сколов относительно штатного состояния, изображенного на рисунке 2, а при усилии на щетку в 4,0 кгс (рисунок 4) к их полному устранению. Таким образом, при увеличении усилия на щетки наблюдается улучшение механики щетка-кольцо за счет уменьшения числа отрывов щеток от кольца и уменьшения числа сколов.



Рисунок 3 – Состояние ЭЩ узла заземления при усилии 3,1 кгс



Рисунок 4 – Состояние ЭЩ узла заземления при усилии 4,0 кгс

Однако, повышение усилия привело к увеличению и нестабильности во времени износов ШЩ. Стоит отметить, что при одинаковых условиях эксплуатации наблюдается нестабильность износа. Для решения данной проблемы нами было предложено установить в тело ШЩ вставку из нетокопроводящей смазывающей щетки (СЩ), выполненной на основе дисульфида молибдена (ДМ) [1, 2, 3]. Дисульфид молибдена (MoS_2)

представляет из себя черный или серо-голубой кристаллический порошок, внешне похожий на графит. Для определения требуемого тангенциального размера и необходимой величины давления на СЩ были проведены дополнительные лабораторные исследования с созданием математических моделей первого порядка.

По результатам исследования можно сделать вывод, что применение СЩ наряду со снижением износов ШЩ привело к значительному увеличению их равномерности во времени. В таблице 1 приведены результаты исследования нестабильности износов ШЩ ЭГ – 61 А, работающих на стальном кольце во времени и их зависимости от использования СЩ, выполненных на основе ДМ. Опыты проводились в течение 210 часов, замеры делались каждые 30 часов.

Таблица 1

Влияние СЩ на стабильность износов ЭЩ

Параметры режима	Длительность наработки, ч						
	30	60	90	120	150	180	210
Материал КК	Сталь						
Материал электрической щетки	ЭГ – 61 А						
Удельное давление, кПа	50						
Износы, мкм/км	$\frac{0,015}{0,008}$	$\frac{0,009}{0,007}$	$\frac{0,018}{0,008}$	$\frac{0,013}{0,009}$	$\frac{0,016}{0,008}$	$\frac{0,009}{0,008}$	$\frac{0,018}{0,008}$
Среднее значение износов ШЩ, мкм/км	$\frac{0,014}{0,008}$						
Примечание: в числителе указан уровень износов без СЩ, в знаменателе – в случае их применения							

Проанализировав данные в таблице, можно сделать вывод, что в случае отсутствия СЩ износы ШЩ носят нестабильный характер на протяжении всего эксперимента. Максимальное отклонение от среднего значения износов ШЩ составляет 36 %. Можно предположить, что причиной данного явления служит нестабильностью дуги контактирования щетка-кольцо, которая по данным может значительно отличаться от кажущейся (~10–2 ... 10–4). Установка СЩ (рисунок 5) приводит к снижению неравномерности износов ШЩ.

Максимальное отклонение от среднего значения износов ШЩ в случае использования СЩ составило 12,5 %. Наблюдаемый эффект можно объяснить влиянием смазки на стабильность дуги контактирования.

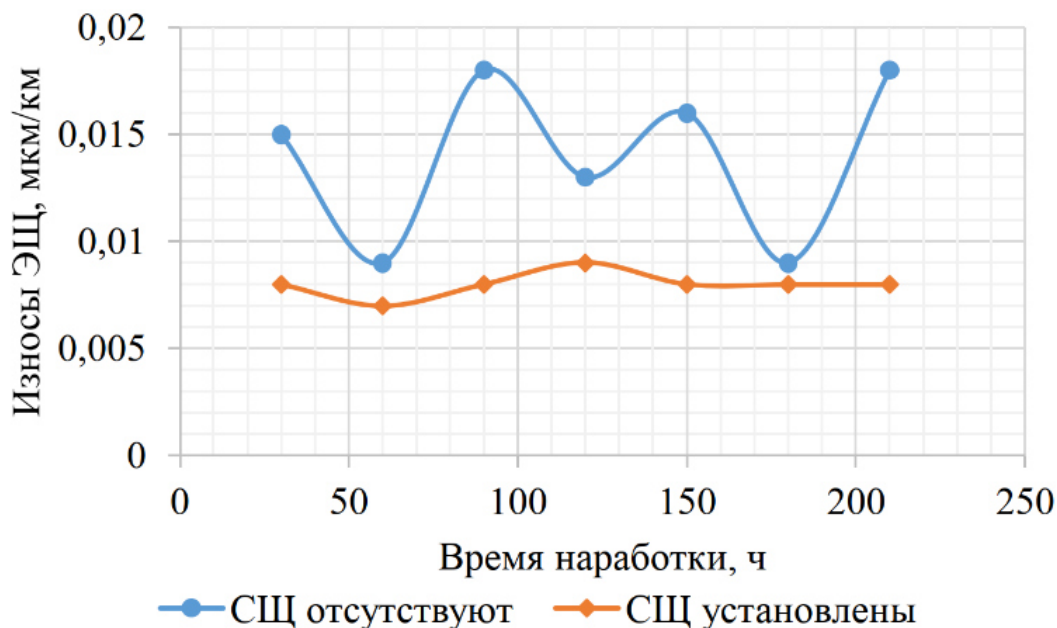


Рисунок 5 – Влияние установки СЩ на стабильность износов ЭЩ ЭГ – 61 А

Список литературы

1. Никулин, С. В. Улучшение свойств щеточного контакта электрических машин : специальность 05 09 01 «Электромеханика и электрические аппараты» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Никулин Сергей Викторович; Вятский государственный университет – Воронеж, 2008. – 18 с. – Место защиты: Воронежский государственный технический университет. – Текст : непосредственный.
2. Колесов, С. Л. Улучшение трибохарактеристик твердощеточного контакта электрических машин с помощью ДМ : специальность 05 09 01 «Электромеханика и электрические аппараты» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Колесов Сергей Львович; Петербургский государственный университет путей сообщения. – Москва, 2001. – 18 с. – Текст : непосредственный.
3. Оценка эффективности применения смазывающих щеток на кольцах турбогенератора / Фоминых А.А. [и др.]. – Текст : непосредственный // Энергетик. – 2015. – №3 – С. 12-15.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Губин Илья Вячеславович

Вятский государственный университет
(ВятГУ).

Студенческий проезд, д. 11, г. Киров,
640033, Российская Федерация.

Аспирант, инженер кафедры «Электрические
машины и аппараты» ВятГУ.

Тел: 8(963)2768842.

E-mail: usr20906@vyatsu.ru.

Куракина Валентина Дмитриевна

Вятский государственный университет
(ВятГУ).

Студенческий проезд, д. 11, г. Киров,
640033, Российская Федерация.

Магистр кафедры «Электрические машины и
аппараты» ВятГУ.

Тел: 8(961)5656846.

E-mail: vkurakina11@gmail.com.

Изотов Анатолий Иванович

Вятский государственный университет
(ВятГУ).

Студенческий проезд, д. 11, г. Киров,
640033, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры «Электрические машины
и аппараты» ВятГУ.

Тел: 8(922)9359668.

E-mail: izotov@vyatsu.ru.

Тимина Наталья Владимировна

Вятский государственный университет
(ВятГУ).

Студенческий проезд, д. 11, г. Киров,
640033, Российская Федерация.

Доцент кафедры «Электрические машины и
аппараты» ВятГУ.

Тел: 8(912)3698697.

E-mail: timina@vyatsu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gubin Ilya Vyacheslavovich

Vyatka state University (VyatSU).

11 Studencheskiy proezd, Kirov, 640033,
the Russian Federation.

Post-graduate student, engineer of the Department
of Electrical machines and apparatuses at Vyatka
state University.

Phone: 8(963) 2768842.

E-mail: usr20906@vyatsu.ru.

Kurakina Valentina Dmitrievna

Vyatka state University (VyatSU).

11 Studencheskiy proezd, Kirov, 640033,
the Russian Federation.

Master of the Department of Electrical machines
and apparatuses at Vyatka state University.

Phone: 8(961) 5656846.

E-mail: vkurakina11@gmail.com.

Izotov Anatoly Ivanovich

Vyatka state University (VyatSU).

11 Studencheskiy proezd, Kirov, 640033,
the Russian Federation.

Candidate of technical Sciences, associate
Professor, Professor of the Department "Electric
machines and apparatuses" of Vyatka state
University.

Phone: 8(922) 9359668.

E-mail: izotov@vyatsu.ru.

Timina Natalia Vladimirovna

Vyatka state University (VyatSU).

11 Studencheskiy proezd, Kirov, 640033,
the Russian Federation.

Associate Professor of the Department of Electrical
machines and apparatuses at Vyatka state
University.

Phone: 8(912) 3698697.

E-mail: timina@vyatsu.ru.

Фоминых Антон Анатольевич
Вятский государственный университет
(ВятГУ).
Студенческий проезд, д. 11, г. Киров,
640033, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Электрические
машины и аппараты» ВятГУ.
Тел: 8(922)6612949.
E-mail: aa_fominyh@vyatsu.ru.

Fominykh, Anton Anatolyevich
Vyatka state University (VyatSU).
11 Studencheskiy proezd, Kirov, 640033,
the Russian Federation.
Candidate of technical Sciences, associate
Professor, head of the Department "Electric
machines and apparatuses" of Vyatka state
University.
Phone: 8(922)6612949.
E-mail: aa_fominyh@vyatsu.ru.

УДК 621.331:621.311.4:621.314

В. Л. Незевак, С. С. Самолинов, Е. К. Хусаинов
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
г. Омск, Российская Федерация

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В статье рассмотрены вопросы, посвященные вопросам оценки эффективности, схемным решениям присоединения систем накопления электроэнергии к системам собственных нужд. Вопросы применения систем накопления рассматриваются для тяговых подстанций постоянного тока на участках с интенсивным применением рекуперативного торможения. Рассматриваемое решение позволяет исключить использование классического выпрямительно-инверторного преобразователя за счет покрытия мощности рекуперации поезда системой накопления электроэнергии и последующего использования в системе собственных нужд. В качестве примера приведена одна из подстанций постоянного тока, для которой применение систем накопления является целесообразным.

Ключевые слова: системы накопления электроэнергии, тяговая подстанция, собственные нужды, тяговое электроснабжение, рекуперация, электроподвижной состав.

Vladislav L. Nezevak, Svyatoslav S. Samolinov, Yermek K. Khusainov
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF USING POWER STORAGE SYSTEMS TO MEET THEIR OWN NEEDS AT DC TRACTION SUBSTATIONS

The article deals with issues related to efficiency assessment, circuit solutions for connecting power storage systems to systems of their own needs. The application of storage systems is considered for DC traction substations in areas with intensive use of regenerative braking. The solution under consideration makes it possible to exclude the use of a classic rectifier-inverter Converter by covering the power recovery of the train with the power storage system and subsequent use in the system for its own needs. As an example, one of the DC substations for which the use of storage systems is appropriate is given.

Keywords: power storage systems, traction substation, own needs, traction power supply.

Внедрение ресурсосберегающих технологий и повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения является одной из приоритетных задач и является одним из основных средств достижения целевых ориентиров Энергетической стратегии холдинга ОАО «РЖД». Перспективным направлением повышения энергетической эффективности является обеспечение приема энергии рекуперации электроподвижного состава в границах межподстанционных зон. В отсутствие выпрямительно-инверторных преобразователей энергия рекуперации не может быть передана на шины низшего и высшего напряжения переменного тока подстанций. При отсутствии систем накопления в системе тягового электроснабжения избыточная энергия рекуперации рассеивается на реостатных устройствах электроподвижного состава или поглощающих устройствах системы тягового электроснабжения. В обоих случаях снижается эффективность применения рекуперативного торможения. Особенно остро данная проблема стоит на однопутных участках постоянного тока с интенсивным применением рекуперативного торможения, что подтверждает ее актуальность для железнодорожного транспорта.

Одним из вариантов решения рассматриваемой задачи является применение систем накопления электроэнергии на тяговых подстанциях постоянного тока. Система накопления электроэнергии (далее СНЭ), подключенная к шинам постоянного тока напряжением 3,3 кВ и шинам собственных нужд переменного тока напряжением 0,4 кВ и системе оперативного постоянного тока тяговой подстанции позволяет осуществлять прием энергии рекуперирующего поезда, обеспечить хранение и питание технологических нагрузок подстанции. Указанное мероприятие позволяет исключить инверторную часть выпрямительно-инверторного преобразователя

для передачи напряжения с шин постоянного тока на сторону низшего напряжения переменного тока 6(10) кВ.

Подключение системы накопления электроэнергии на тяговой подстанции для питания собственных нужд целесообразно выполнять к шинам 3,3 кВ через преобразователь П1 постоянно-постоянного напряжения (рисунок 1) для приема энергии рекуперации из контактной сети (к.с) от электроподвижного состава (ЭПС).

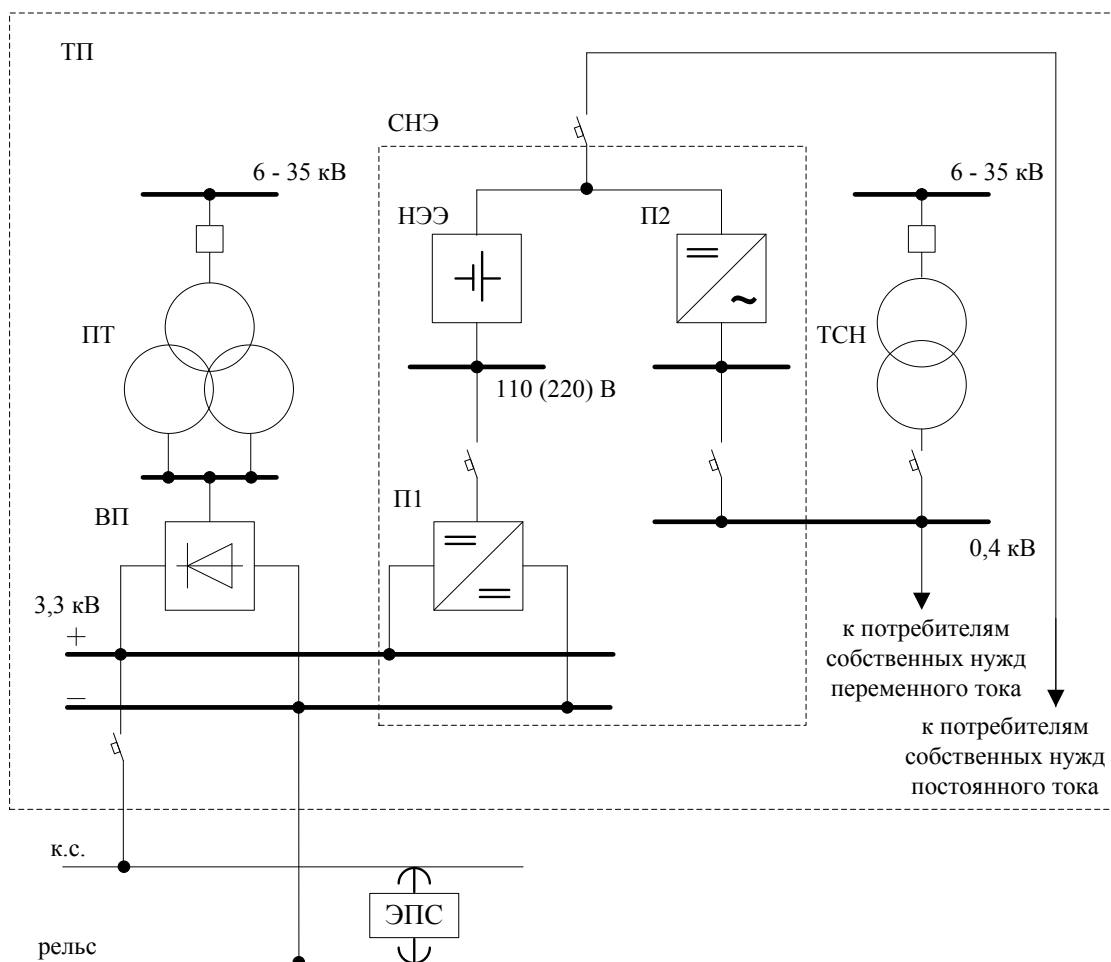


Рисунок 1 – Схема подключения системы накопления электроэнергии для питания цепей собственных нужд подстанции

При применении СНЭ без аккумуляторной батареи на подстанции подключение к шинам постоянного тока осуществляется аналогично подключению стационарной аккумуляторной батареи (рисунок 2, а). Схема включения на шины постоянного тока параллельно с существующей аккумуляторной батареей приведена на рисунке 2, б. Подключение к шинам постоянного тока для покрытия максимальных нагрузок или падения (провале, исчезновении) напряжения с

использованием блока управления БУ и измерительных средств приведено на рисунке 2, в. Подключение для питания шин переменного тока через преобразователь (инверторный преобразователь ИП) показано на рисунке 2, г.

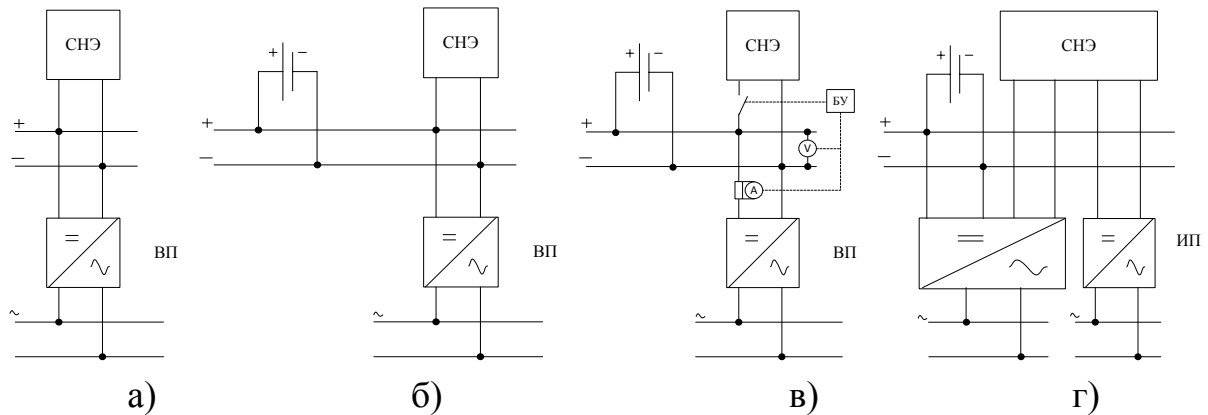


Рисунок 2 – Варианты применения накопителей
в системе постоянного оперативного постоянного тока

Подключение к шинам переменного тока осуществляется с помощью преобразователя (для обеспечения работы в режиме постоянного подзаряда). Включение в режим разряда в данном случае осуществляется при провале или исчезновении напряжения (рисунок 3).

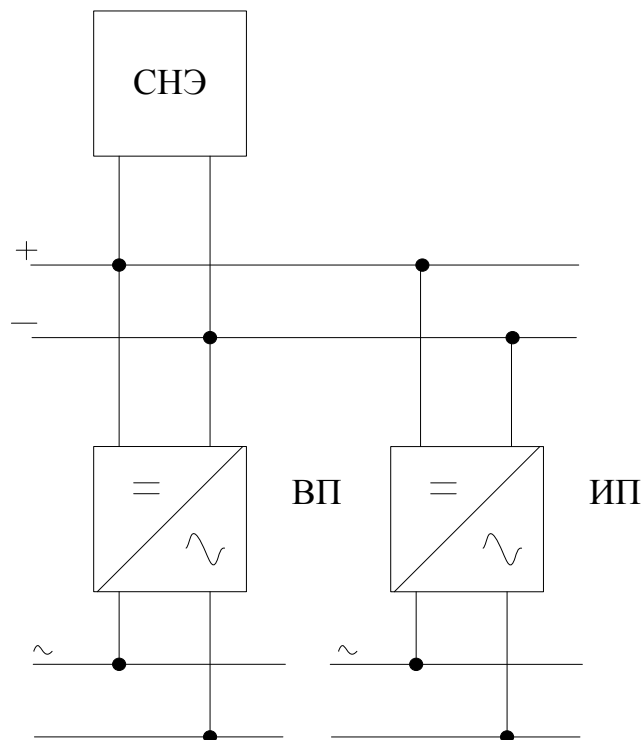
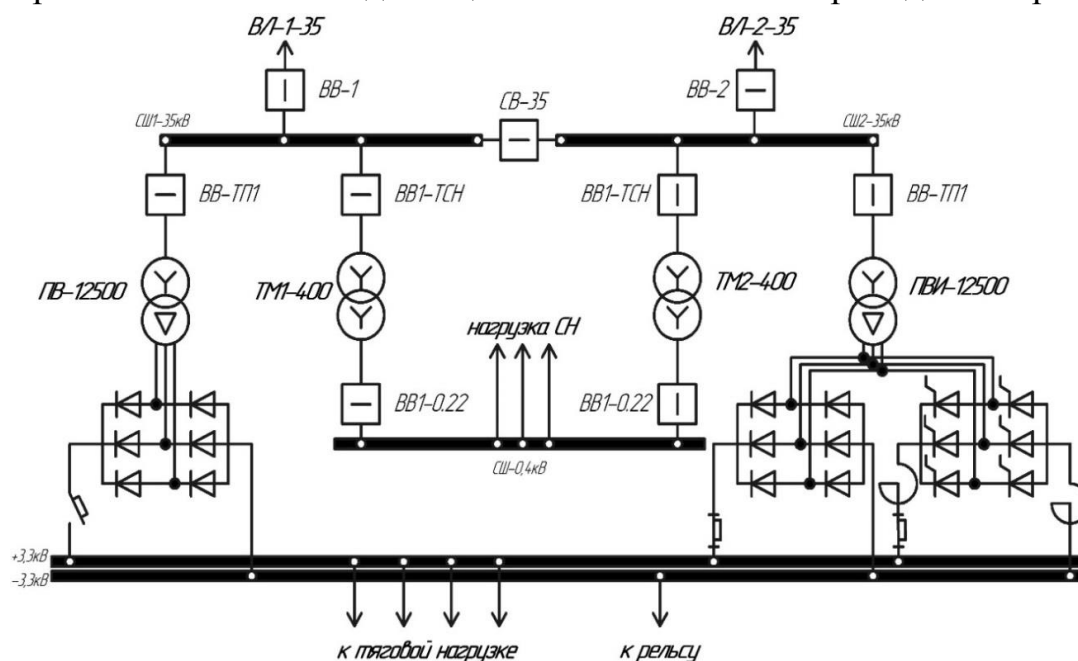


Рисунок 3 – Применение накопителей
в системе переменного оперативного тока

В качестве перспективных мест установки СНЭ рассматриваемых систем выделяют одно- и двухпутные участки с интенсивным рекуперативным торможением. Последнее может быть обусловлено как цикличностью режимов разгон-торможение, так сложностью профиля пути участка и особенностями организации движения поездов.



Предполагается, что энергия, возвращённая через фидер контактной сети и выпрямительно-инверторный преобразователь ПВИ-12500 будет возвращаться не во внешнюю энергосистему через линию ВЛ-1-35, а в систему СНЭ, подключенную к шинам +3,3 кВ. Система СНЭ подключается со стороны шин собственных нужд СШ-0,4 кВ для передачи энергии потребителям подстанции. В этом случае в схеме подстанции преобразователь ПВИ-12500 заменяется выпрямительным преобразователем ПВ-12500.

энергии АСКУЭ «Энергия Альфа-2». В качестве рассматриваемого периода времени были выбраны рабочие сутки. Сравнение расхода электроэнергии на СН и объем возврата энергии рекуперации во внешнюю энергосистему за сутки показывает соотношение 1/1,2, т.е. возврат энергии рекуперации превышает электропотребление на собственные нужды на 20 %. Указанное соотношение объемов электроэнергии позволяет покрыть расходы на собственные нужды с учетом потерь в преобразователе системы накопления электроэнергии.

Особенностью рекуперативного торможения поезда является его относительно небольшая продолжительность (2 – 5 минут), а также большие токи инвертирования до 2000 А при повышенном напряжении до 4000 В постоянного напряжения. Данные обстоятельства накладывают требования к энергоемкости СНЭ, например, к характеристике заряда, так как в короткий промежуток времени необходимо принять большой объем энергии.

Мощность трансформаторов собственных нужд тяговых подстанций (ТСН) находится в диапазоне 160 – 400 кВ·А, что обуславливает необходимость выбора мощности и энергоемкости системы СНЭ. В связи с тем, что в ряде случаев избыточная мощность рекуперативного торможения может превысить мощность ТСН, при выборе мощности системы СНЭ необходимо обеспечить прием большей части избыточной мощности рекуперации. Указанное обстоятельство может привести к необходимости увеличения полной энергоемкости системы СНЭ и снижению эффективности проекта.

Экономический эффект рассматриваемого предложения заключается в снижении (исключении) расходов на собственные нужды подстанции. Для рассматриваемой подстанции экономия за счет снижения электропотребления на СН из внешней сети составит около 1,5 млн. рублей. К косвенным эффектам следует отнести снижение эксплуатационных расходов за счет замены инверторного преобразователя подстанции и повышение ресурса тормозной системы ЭПС при рекуперативном торможении.

Таким образом применение системы СНЭ для обеспечения электропотребления собственных нужд тяговых подстанций направлено на повышение энергетической эффективности и снижение электропотребления. Эффективное решение указанной задачи зависит от выбора преобразователя системы накопления электроэнергии, методологии определения параметров и вида накопительных элементов с учетом профиля пути участка, показателей работы системы тягового электроснабжения и собственных нужд подстанции.

Список литературы

1. Незевак, В. Л. Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин Шатохин. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 2 (75). – С. 84-94.
2. Доманов, К. И. Исследование режимов работы системы тягового электроснабжения в целях установки накопителя электрической энергии / К. И. Доманов, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2018. – № 2 (34). – С. 65-75.
3. Незевак, В. Л. Основные подходы к построению систем оперативного тока на тяговых подстанциях с использованием накопителей электрической энергии / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Сборник трудов науч.-практ. конференции / Красноярский институт железнодорожного транспорта. – Красноярск : КРИЖТ, 2014. – С. 131-136.
4. Незевак, В. Л. Моделирование процессов электропотребления на тягу при изменении параметров графика движения поездов на электрифицированных участках с III и IV типом профиля пути / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 1 (61). – С. 156-166.
5. Черемисин, В. Т. Характеристики профилей пути на электрифицированных участках железных дорог в аспекте классификации типов / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. Е. Перестенко. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 2 (66). – С. 118-128.
6. Незевак, В. Л. Оценка изменения объема электропотребления на тягу от графика движения поездов на участках с I типом профиля пути на основе регрессионных моделей и нейронных сетей / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2017. – № 4 (55). – С. 65-70.
7. Незевак, В. Л. Совершенствование модели влияния параметров графика движения поездов на тяговое электропотребление на участках постоянного и переменного тока с I и II типом профиля пути при помощи регрессионных моделей и нейронных сетей / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 6 (66). – С. 34-44.
8. Nezevak, V. Electric energy storage units applicability assessment of different kinds in the conditions of Moscow central ring / V. Nezevak, V. Cheremisin, A. Shatokhin // Advances in Intelligent Systems and Computing : VIII International Scientific Siberian Transport Forum. – 2020. – Т. 1115. – PP. 42-51. – DOI:10.1007/978-3-030-37916-2.

9. Черемисин, В. Т. Перспективы применения систем накопления электроэнергии на Московском центральном кольце / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2020. – № 2. – С. 33-44.

10. Nezevak, V. Operating modes of electric energy storage systems on the Moscow Central Ring / V. Nezevak, V. Cheremisin, A. Shatokhin // E3S Web of Conferences. – 2019. – Т. 135. – № 01063. – DOI:10.1051/e3sconf/201913501063.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Незевак Владислав Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д.35, г. Омск, 644041, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-46.
E-mail: NezevakWL@mail.ru.

Самолинов Святослав Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д.35, г. Омск, 644041, Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» ОмГУПС.
Тел.: (3812) 44-27-61.
E-mail: samolinov97@mail.ru.

Хусаинов Ермек Кенжебулатович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д.35, г. Омск, 644041, Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС.
Тел.: (3812) 44-27-67.
E-mail: husainov0908@rambler.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nezevak Vladislav Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., 35, Omsk, 644041, the Russian Federation.
PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Supply of Railway Transport Department.
Phone: (3812) 31-34-46.
E-mail: NezevakWL@mail.ru.

Samolinov Svyatoslav Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., 35, Omsk, 644041, the Russian Federation.
Postgraduate student at the Department of «Rolling stock of electric Railways» OSTU.
Phone: (3812) 44-27-61.
E-mail: samolinov97@mail.ru.

Khusainov Ermek Kenzhebulatova

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., 35, Omsk, 644041, the Russian Federation.
Postgraduate student at the Department of «The supply of rail transport » OSTU.
Phone: (3812) 44-27-67.
E-mail: husainov0908@rambler.ru.

«БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

УДК 621.311-021.456

А. Н. Сухарукова¹, А. А. Хорошавина²

¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
г. Хабаровск, Российская Федерация,

²Хабаровское предприятие Магистральных электрических сетей – филиал
«Россети ФСК ЕЭС» – г. Хабаровск, Российская Федерация

АСПЕКТЫ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В работе проводится анализ задач, решаемых современными системами мониторинга качества электрической энергии и подчеркивается важность наличия таких систем на тяговых подстанциях железных дорог. На примере анализа замеров показателей качества электрической энергии на шинах трансформаторных подстанций системы внешнего электроснабжения показывается негативное влияние тяговой нагрузки на синусоидальность и отклонение напряжения в питающей энергосистеме.

Ключевые слова: автоматическая система мониторинга, качество электрической энергии, прогнозная аналитика.

Anna N. Sukharukova¹, Anastasia A. Horoshavina²

¹Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation,

²Khabarovsk Enterprise of Backbone Electrical Networks – branch of "Rosseti FGC UES",
Khabarovsk, the Russian Federation

ASPECTS OF POWER QUALITY MONITORING AND MANAGMANT AT THE AC TRACTION SUBSTATIONS

The paper deals with analyzes the problems solved by modern power quality monitoring systems and emphasizes the importance of having such systems at railway traction substations. The negative influence of traction load on sinusoidality and voltage deviation in the power supply

system is shown on the example of the analysis of measurements of powerquality indicators on the buses of substations of the external power supply system.

Keywords: automotive monitoring system, power quality, predictive analytics.

Электрическая энергия в настоящее время рассматривается как специфический товар, который должен соответствовать определенным требованиям качества. Качество электрической энергии (КЭ), аспекты его измерения, нормирования и контроля регламентируются не только нормативно-правовыми документами, но и договорными отношениями между поставщиками и потребителями электрической энергии (ЭЭ) [1-4]. В гражданском кодексе Российской Федерации, ст.542, записано, что “качество подаваемой энергии должно соответствовать требованиям, установленным в соответствии с законодательством Российской Федерации”, а в ст.543 сказано, что “абонент обязан обеспечивать надлежащее техническое состояние и безопасность эксплуатируемых энергетических сетей, приборов и оборудования, а также немедленно сообщать энергоснабжающей организации об нарушениях, возникающих при пользовании энергией” [4]. Таким образом, согласно современному представлению о качестве оказания услуг и качестве товара за КЭ приходится отвечать и энергоснабжающим предприятиям, и потребителям [3]. Именно поэтому вопросы мониторинга и управления КЭ являются актуальными в современных экономических условиях.

Требования к качеству электрической энергии установлены в ГОСТ 32144-2013 [1], и нарушение этих требований могут привести к серьезным последствиям: сокращению сроков службы оборудования, перегрузкам на отдельных элементах системы электроснабжения, которые в дальнейшем окажут негативное влияние на экономические потери и ущерб, а также могут перерасти в аварии и в простой оборудования, привести к повышению брака при производстве и к массе других негативных аспектов [3].

Точками контроля КЭ являются точки передачи электрической энергии от поставщика к потребителю, именно в этих точках необходимо производить мониторинг показателей качества электрической энергии (ПКЭ) [1,2]. Значения ПКЭ по согласованию обеих сторон (поставщика и потребителя ЭЭ) заносятся в договор на электроснабжение и могут служить основанием для изменения стоимости ЭЭ в случае ухудшения (или улучшения) КЭ в точке контроля. Для

системы электроснабжения электрифицированных железных дорог точками передачи ЭЭ от системы внешнего электроснабжения к потребителям, которые находятся в системах тягового и нетягового электроснабжения, являются шины высшего напряжения тяговых подстанций.

Наличие в точках передачи ЭЭ системы мониторинга КЭ позволит решить ряд задач, которые позволят лучше координировать взаимодействие между системами внешнего и тягового электроснабжения. Примерный перечень таких задач приведен в качестве диаграммы на рисунке 1.



Рисунок 1 – Задачи, решаемые системами мониторинга КЭ

В системе внешнего электроснабжения системы автоматического контроля и мониторинга КЭ начали появляться в качестве пилотных проектов несколько лет назад. Примером такого внедрения является ввод в эксплуатацию автоматизированных систем мониторинга и управления качеством электрической энергии Федеральной сетевой компанией Единой энергетической системы (Россети ФСК ЕЭС, публичное наименование ПАО “ФСК ЕЭС”). На данный момент на территории РФ реализуется пилотный проект инновационного развития ПАО “ФСК ЕЭС” [5], направленный на построение системы управления КЭ на основе непрерывного мониторинга КЭ, реализация которого по плану осуществляется в 2016–2025гг. На текущий момент проект охватывает 4 предприятия межрегиональной электрической сети Востока (МЭС Востока), которые расположены в Хабаровском, Забайкальском

и Красноярском краях, а также на территории Амурской области.

Управление качеством электроэнергии как система методических, технических и организационных мероприятий, направленных на обеспечение КЭ в системах электроснабжения, возможна только при организации мониторинга. Автоматизированная система мониторинга КЭ позволяет на основе объективной информации по КЭ разрабатывать и реализовывать эффективные мероприятия по обеспечению требований нормативных документов на КЭ как за счет сетевой компании, так и с привлечением потребителей, вносящих искажения в сеть.

В рамках контроля КЭ были проанализированы базы данных измерений, зафиксированные существующей системой мониторинга ПАО «ФСК ЕЭС», установленной на шинах трансформаторных подстанций системы внешнего электроснабжения, и далее был произведен анализ ПКЭ с фиксацией типов потребителей, питающихся от этих подстанций.

Результаты произведенного анализа представлены на рисунке 2.

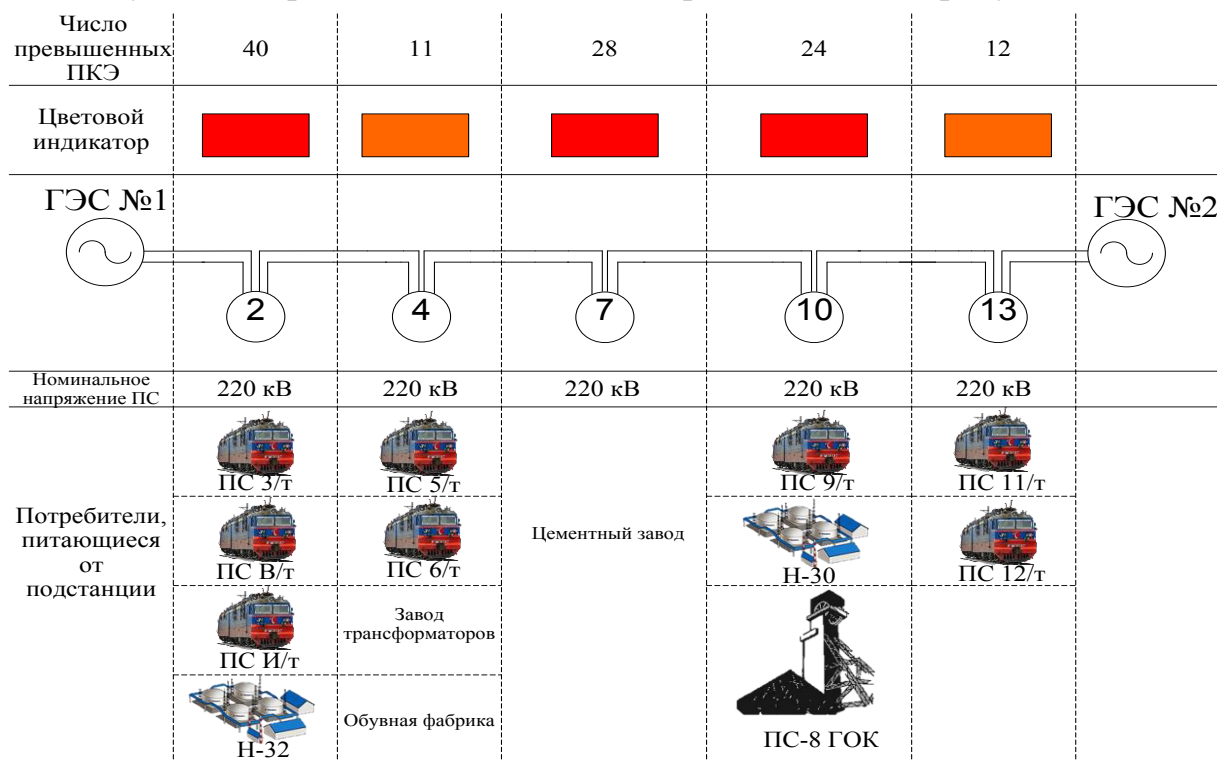


Рисунок 2 – Результаты анализа ПКЭ системой мониторинга ПАО «ФСК ЕЭС»

В рамках проводимого исследования любое несоответствие ПКЭ нормам ГОСТа 32144-2013 принималось равным 1. Например, каждое превышение положительного отклонения линейного напряжения по каждой из трех фаз

считалось равным 1. В гармоническом составе каждое ухудшение по одной гармонике по каждой фазе также принималось равным 1. Таким образом, на рисунке 2 в верхней его части указанное количество ПКЭ значительно больше, чем число нормированных ПКЭ по [1]. Так, максимальное число для подстанции 2 на схеме рисунка 2 составило 40 ПКЭ, потому что неудовлетворительным признано КЭ по сразу нескольким ПКЭ:

- положительное отклонение напряжения в каждой из трех фаз;
- коэффициенты n -ой гармонической составляющей напряжения для 3, 5, 7, 9, 11 и 13-ой гармоникам напряжения (в различных комбинациях по каждой из трёх фаз);
- суммарный коэффициент гармонической составляющей напряжения по каждой из фаз;
- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности по некоторым фазам.

Исходя из совокупности всех проведенных расчетов, можно сделать вывод о том, что КЭ по коэффициентам n -ой гармонической составляющей напряжения является неудовлетворительным для всех рассмотренных подстанций, т.к. имеются превышения отдельно взятых гармонических составляющих по всем фазным напряжениям.

Анализируя состав крупных потребителей на рисунке 2, которые присоединяются к шинам понизительных трансформаторных подстанций, можно увидеть, что помимо предприятий железнодорожного транспорта в лице тяговых подстанций, есть и другие потребители. Так, от трансформаторных подстанций, расположенных в системе внешнего электроснабжения ПАО «ФСК ЕЭС», получают питания промышленные предприятия, специфика работы которых также может быть сопряжена с искажением КЭ. Поэтому особую важность приобретают вопросы установления виновника в ухудшении КЭ среди потребителей различного типа и обозначении степени ответственности за вносимые искажения (доли вклада в ухудшение КЭ) путем регулирования коммерческих взаимоотношений между поставщиком и потребителем ЭЭ.

В противном случае, поставщик ЭЭ может вменять всем потребителям, потенциально виновным в ухудшении КЭ, штрафные санкции в виде надбавки к тарифу на ЭЭ. Очевидно, что такой процесс определения самого факта ухудшения ПКЭ и определения доли тяговой нагрузки в общую картину

ухудшения КЭ будет затруднен при отсутствии на шинах тяговых подстанций систем мониторинга КЭ. Поэтому, в современных сложных экономических условиях крайне целесообразным представляется внедрение систем мониторинга КЭ на тяговых подстанциях и их интеграция в системы управления КЭ.

Список литературы

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения = Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст : введен впервые : дата введения 2014-07-01 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью «ЛИНВИТ» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». – Москва : Стандартинформ, 2014. – 20 с. – Текст : электронный // Техэксперт : сайт. – URL: <http://docs.cntd.ru> (дата обращения : 24.11.2020).

2. ГОСТ 33073–2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения = Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Control and monitoring of electric power quality in the public power supply systems : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 декабря 2014 г. № 1948-ст : переиздание. февраль 2019 г. : дата введения 2015-01-01 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью "ЛИНВИТ" и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 "Электромагнитная совместимость технических средств" – Москва : АО «Кодекс», 2015. – Текст : электронный // Техэксперт : сайт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200115349> (дата обращения: 24.11.2020).

3. Макашева, С. И. Качество электрической энергии: мониторинг, прогноз, управление : монография. / С. И. Макашева, П. С. Пинчуков. – Хабаровск : Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2020. – 114 с. : ил. – Текст : непосредственный.

4. Гражданский кодекс Российской Федерации : Федеральный закон № 14-ФЗ (часть вторая, статьи 454–1109) [принят Государственной Думой 22 декабря 1995 г. в редакции от 18 марта 2019г., с изменениями от 28 апреля 2020г.] – Текст : электронный // Техэксперт : сайт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/9027703> (дата обращения: 15.11.2020).

5. Программа инновационного развития ПАО «ФСК ЕЭС» на 2016-2020 годы с перспективой до 2025 года. – Текст : электронный // ПАО «ФСК ЕЭС» – URL:https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/2017_PIR_FSK_2016-2020-2025.pdf (дата обращения 14.11.2020).

Научный руководитель – к.т.н., доцент кафедры «Системы электроснабжения» С. И. Макашева, ДВГУПС.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сухарукова Анна Николаевна

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).
Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.
Магистрант, студент группы ЭЛ1 ДВГУПС.
Тел.: +7-909-859-21-09.
E-mail: sukharukova98@mail.ru.

Хорошавина Анастасия Андреевна

Филиал «Россети ФСК ЕЭС» – Хабаровское ПМЭС.
Целинная ул., 3, г. Хабаровск, , 680032, Российская Федерация.
Инженер второй категории.
Тел.: +7-924-319-45-28.
E-mail: horoshavina-aa@hpmes.khv.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sukharukova Anna Nikolaevna

Far Eastern State Transport University (FESTU).
47, Seryshev st., Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.
Master student FESTU.
Phone: +7-909-859-21-09.
E-mail: sukharukova98@mail.ru.

Horoshavina Anastasia Andreevna

Rosseti FGC (Federal Grid Company) – Khabarovsk Branch.
3, Celinnaya st., Khabarovsk, 680032, the Russian Federation.
Engineer.
Phone: +7-924-319-45-28.
E-mail: horoshavina-aa@hpmes.khv.ru.

А. П. Костин

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
г. Хабаровск, Российская Федерация

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В работе приводится анализ устройств релейной защиты и автоматики, их возможности и недостатки. Рассматривается вопрос о повышении надежности функционирования релейной защиты путем использования цифровых тяговых подстанций.

Ключевые слова: контактная сеть, короткое замыкание, релейная защита, цифровая подстанция, цифровая железная дорога.

Alexey P. Kostin

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

ON THE ISSUE OF IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC ENERGY RECOVERY IN THE AC TRACTION NETWORK

The paper provides an analysis of relay protection and automation devices, their capabilities and disadvantages. The issue of increasing the reliability of the functioning of relay protection by using digital traction substations is considered.

Keywords: catenary, short circuit, relay protection, digital substation, digital railway.

В настоящее время, основной задачей в системе тягового электроснабжения является обеспечение надежного функционирования электрифицированных железных дорог. В первую очередь, для этого необходимо обеспечить бесперебойную работу устройств РЗА (релейной защиты и автоматики), которая будет обеспечивать безопасное функционирование всей системы тягового электроснабжения.

Важно уделить внимание защите контактной сети, так как она не имеет резерва, а обслуживание при загруженном графике движения затруднено. При

коротком замыкании и аварийных режимах работы на контактной сети их отключение обеспечивается релейной защитой фидеров контактной сети, которая так же фиксирует множество параметров КЗ в момент аварии и является основным элементом комплекса релейных защит в системе тягового электроснабжения [1]. Сегодня представителями цифровых блоков РЗА, эксплуатируемых на электрифицированных железных дорогах, являются: БМРЗ-ФКС, ЦЗА-ФКС, ИнТер-ФКС, Сириус ЖД ФКС. Такие блоки имеют ряд преимуществ над предшествующими им электронными реле и реле на базе интегральных микросхем. Так, микропроцессорные блоки измеряют те же параметры, но вдобавок ко всему имеют еще десятки разных функций, на основе анализа нескольких параметров. Они могут определять причину отключения, время отключения, длительность отключения, дату, ток и длительность аварийного режима, имеют самодиагностику центрального процессора и т.д. [2]. Перечень функций блоков РЗА, эксплуатируемых на электрифицированных железных дорогах, приведен в таблице 1.

Таблица 1

Наличие функций в устройствах РЗА на ЖД

Наименование функции блока защиты	Наименование блока защиты и автоматики			
	СИРИУС ЖД-ФКС	ЦЗА- ФКС	БМРЗ- ФКС	ИнТер-ФКС
Токовые отсечки	+	+	+	+
Четырехступенчатая ДЗ	+	+	+	+
Направленная защита	+	+	+	+
Дуговая защита	+	-	+	+
Резервирование при отказе выключателя (УРОВ)	+	+	+	+
Однократное АПВ	-	-	+	-
двукратное АПВ	+	+	-	+
ОМП	+	+	+	+

Современные микропроцессорные устройства РЗА, в случае аварии, с высокой точностью определяют поврежденные участки и селективно их отключают. При успешном срабатывании устройств релейной защиты необходимо правильно определить расстояние до места повреждения, в

кратчайшие сроки добраться до него, а затем оперативно устранить.

Ввиду того, что существующие блоки РЗА не объединены единой сетью и общей информационной системой их возможности используются не в полной мере. Например, после отключения тяговой сети запускается функция ОМП (определения места повреждения) в блоках РЗА, при её наличии. Но ввиду некоторых недостатков, погрешность используемого способа поиска места повреждения достигает 30 % [3]. Отсюда можно сделать вывод, что несмотря на то, что тяговая сеть остается защищенной, задача эффективного и быстрого поиска места повреждения в тяговой сети переменного тока является нерешенной ввиду недостатков существующих алгоритмов поиска. Чтобы повысить надежность функционирования подходить к решению данной проблемы необходимо комплексно,

В связи с тем, что с 2016 года ОАО «РЖД» начала осваивать в различных регионах нашей страны комплексный научно-технический проект «Цифровая железная дорога», который в первую очередь направлен на внедрение цифровых подстанций, состоящих из интеллектуального первичного оборудования, можно сделать вывод, что высокий потенциал цифровизации тяговых подстанций можно использовать в качестве инструмента для обеспечения задач по бесперебойной работе устройств РЗА.

Элемент, занимающий ключевую роль в программе цифровизации - цифровая подстанция, которая состоит из интеллектуального первичного оборудования (электронные измерительные трансформаторы, интеллектуальные выключатели и т.п.) и вторичного оборудования (сети управления, объединяющие устройства и т.п.), соединенное между собой посредством протоколов связи по стандарту IEC 61850 (МЭК 61850) [4].

Набор стандартов цифровой тяговой подстанции согласно требованиям МЭК 61850 развивается и активно поддерживается производителями устройств релейной защиты, автоматики, телемеханики, измерительных устройств [5]. Следовательно производители этих устройств на высоком уровне рассматривают широкие функциональные возможности, которые открывают использование цифровизации, в качестве перспективных способов решения всевозможных проблем работы электрических сетей как тяговых, так и промышленных.

Например, при поиске места повреждения недостаток существующего

метода в том, что он не учитывает нелинейных переходных сопротивлений, которые дополняются индуктивным и емкостным сопротивлением контактной сети, учитывая различные способы заземления опор контактной сети [6]. Так же следует учитывать схему питания тяговой сети, с учетом взаимных индуктивных связей между контактными проводами и рельсами. В связи с этим можно сделать вывод, что защита тяговых сетей на электрифицированных железных дорогах может быть выполнена на новых цифровых подстанциях более эффективно за счет повышения быстродействия и точности определения места повреждения в контактной сети, связанной с большим объемом обрабатываемой информации [7].

Имеющийся опыт эксплуатации автоматизированных систем мониторинга, которые имеют широкие возможности, уже сейчас накопил весомую базу данных, которую можно использовать для решения проблемы надежности и точности функционирования релейных защит [8,9]. При этом, определение значений контролируемых параметров должно позволить точно определить место повреждения на основании использования диагностической информации и сократить время на определение места повреждения за счет быстроты реакции элементов цифровой тяговой подстанции.

Научный руководитель – к.т.н, доцент кафедры «Системы электроснабжения», директор Электроэнергетического института П. С. Пинчуков, ДВГУПС

Список литературы

1. Мындреску, Е. В. Поведение и состояние защит контактной сети переменного тока в современных условиях / Е. В. Мындреску, П. С. Пинчуков. – Текст : непосредственный // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. –2016. – Т. 1. С. – 308-312.
2. Базыль, И.М Тенденции развития микропроцессорных устройств релейной защиты // И.М. Базыль, А.В. Верижников – Текст : непосредственный // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – №12. – С. 186-189.
3. Пинчуков, П.С. Повышение эффективности работы релейной защиты при цифровизации железной дороги / П. С. Пинчуков, С. И. Макашева, А. П. Костин – Текст : непосредственный // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Доклады научно-практической конференции. — 2019. – С. 275-277.

4. ГОСТ Р МЭК 61850-7-1-2009. Сети и системы связи на подстанциях. Часть 7. Базовая структура связи для подстанций и линейного оборудования = Communication networks and systems in substations. Part 7. Basic communication structure for substation and feeder equipment : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2009 г. № 847-ст: введен впервые : дата введения 2011-07-01 / подготовлен Открытым акционерным обществом "Научно-технический центр электроэнергетики" на основе аутентичного перевода на русский язык, выполненного Обществом с ограниченной ответственностью "ЭКСПЕРТЭНЕРГО". – Москва : Стандартинформ, 2011. – Текст : непосредственный.

5. Бовыкин, В. Н. Пример использования МЭК 61850 при создании ССПИ подстанций / В. Н. Бовыкин, А.В. Мокеев – Текст: непосредственный // Технические и программные средства систем автоматизации. Телекоммуникационные системы для энергетики. – 2015. – № 7 (72). – С. 49-55.

6. Пинчуков, П. С. Комплексная оценка работы релейной защиты тяговой сети переменного тока / П. С. Пинчуков, С. И. Макашева, А. П. Костин – Текст : непосредственный // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2020. – № 7 (92). – С. 27-38.

7. Костин, А. П. Цифровизация тяговых подстанций как инструмент решения проблемы обнаружения места повреждения в контактной сети / А. П. Костин, С. И. Макашева, П. С. Пинчуков. – Текст : непосредственный // Постулат. – 2018.

8. Makasheva, S. I. Expanding the functionality of automated monitoring systems for traction substations /S. I. Makasheva, P. S. Pinchukov // MATEC Web of Conf. – 2018. – Volume 238. – Siberian Transport Forum - TransSiberia 2018 – . – Текст : электронный // URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/98/mateconf_ts2018_01014/mateconf_ts2018_01014.html. – Дата публикации: 27.11.2018.

9. Макашѐва, С. И. Автоматизированная система мониторинга как инструмент бережливого производства системы тягового электроснабжения / С. И. Макашева. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2016. – № 2. – С. 52-55.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Костин Алексей Петрович

Дальневосточный государственный
университет путей сообщения (ДВГУПС).

ул. Серышева, д. 47. г. Хабаровск,
680021, Российская Федерация.

Аспирант 1-го года обучения кафедры
Системы электроснабжения, направление
23.06.01 Техника и технологии наземного
транспорта Тел.: +7 -962-222-88-66.

E-mail: kostinsssl@icloud.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kostin Aleksey Petrovich

Far Eastern State Transport University
(FESTU).

Khabarovsk, Serysheva st., 47, 680021,
the Russian Federation.

Postgraduate student of the 1st year of study of
the Department of Power Supply Systems,
direction 23.06.01 Engineering and Technology
of Land Transport.

Phone: +7 -962-222-88-66.

E-mail: kostinsssl@icloud.com

УДК 656.1

И. Л. Громыко, В. Н. Галушко, В. О. Белькин

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ),
г. Гомель, Республика Беларусь

ДИАГНОСТИКА ТРАНСФОРМАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ПРИБОРНОГО УЧЕТА ПРИ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ

Рассмотрены методы диагностики и признаки появления межвитковых замыканий трансформатора. Разработан комплексный подход для выявления межвитковых коротких замыканий, а также исследованы приборно-аналитические предпосылки прогнозирования остаточного срока службы изоляции трансформаторов.

Ключевые слова: трансформатор, межвитковое замыкание, короткое замыкание, короткозамкнутые витки, старение изоляции, нейромоделирование, нейромодель, нейронная сеть.

Victor N. Galushko, Ivan L. Hramyka, Vladislav O. Belkin

Belarusian State University of Transport (BSUT), Gomel, Republic of Belarus

DIAGNOSTICS OF THE TRANSFORMER USING THE COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE INSTRUMENT MEASURING DATA IN INTER- CIRCULAR CIRCUITS

The methods of diagnostics and signs of the appearance of interturn short circuits of the transformer are considered. An integrated approach has been developed for identifying turn-to-turn short circuits, and the instrumental and analytical prerequisites for predicting the residual service life of transformer insulation have been investigated.

Keywords: transformer, turn-to-turn circuit, short circuit, short-circuited turns, aging of insulation, neuromodelling, neuromodel, neural network.

Экономическая ситуация, сложившаяся в последние годы в энергетике, заставляет принимать меры, направленные на увеличение сроков эксплуатации различного оборудования. Решение задачи по оценке технического состояния электротехнического оборудования электрических сетей в значительной мере связано с внедрением эффективных методов инструментального контроля и технической диагностики.

Основной целью технической диагностики являются в первую очередь распознавание состояния технической системы в условиях ограниченной информации и, как следствие, повышение надежности и оценка остаточного ресурса оборудования.

Неотъемлемым элементом при централизованном электроснабжении является трансформатор. Выход из строя силового трансформатора может привести к созданию аварийных ситуаций, перебоям электроснабжения, массовому недоотпуску продукции, сопровождающимся значительным экономическим и экологическим ущербом. Поэтому, контроль состояния трансформатора является важной задачей.

Диагностика трансформаторов сегодня довольно долгое и затратное мероприятие. Часто необходимо провести целый ряд непростых испытаний, так как современные методы диагностики не всегда однозначно указывают на место и вид дефекта. Надежность электрической машины в значительной степени определяется надежностью обмоток, которая в свою очередь зависит от состояния изоляции. Изоляция работает в сложных, часто весьма неблагоприятных условиях. В процессе эксплуатации электрических машин, а также во время их хранения и транспортировки, они подвергаются разнообразным внешним воздействиям, приводящим с течением времени к прогрессирующему ухудшению свойств изоляции.

Основными причинами возникновения межвитковых замыканий в трансформаторе являются старение изоляции, перенапряжения или низкая организация производства и эксплуатации. Классификация факторов, влияющих на возникновение замыканий приведена на рисунке 1. Приведенная классификация факторов, влияющих на межвитковое замыкание, показывает, что причины нарушения изоляции могут быть связаны или могут проявляться обособленно, что затрудняет поиск решения по защите обмоток трансформаторов от межвитковых замыканий [1].

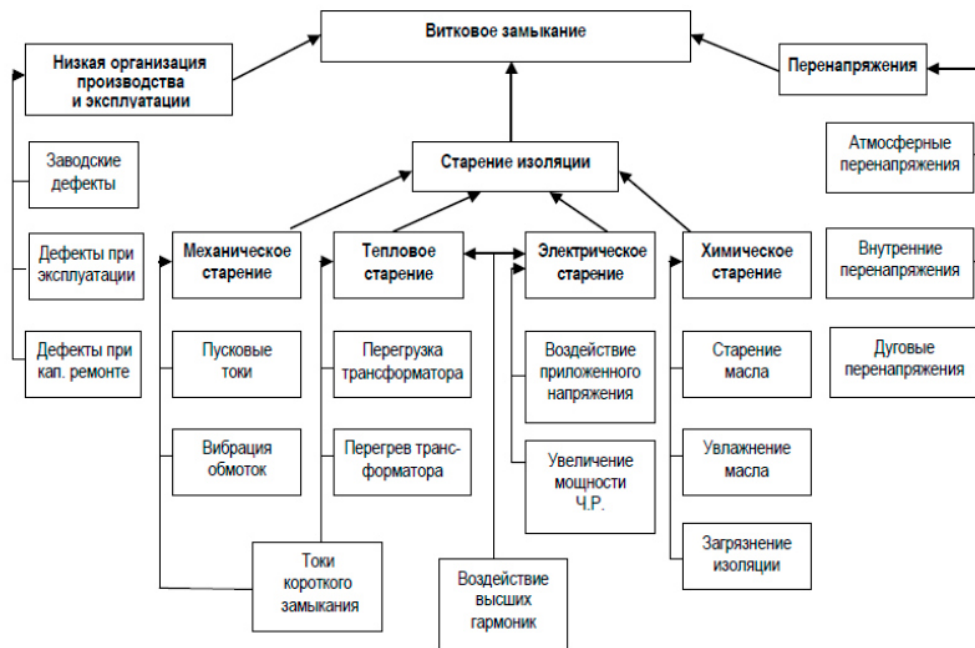


Рисунок 1 – Классификация факторов, влияющих на возникновение межвитковых замыканий трансформаторов

В работе «Прогнозирование срока службы электрических машин» авторы В.Е. Воробьев и В.Я. Кучер [2] описали закономерности старения изоляции. Также было рассмотрено старение изоляции под действием температуры, электрического поля, механических нагрузок, влаги и химически активных веществ. В работе отмечается, что скорость старения изоляции определяется в основном эксплуатационными условиями и свойствами применяемых материалов, а на образование местных дефектов оказывает значительное влияние уровень технологии и общей культуры производства, условия хранения трансформатора, его транспортировка и монтаж.

Описание методов диагностики электрооборудования приведено в учебном пособии «Диагностика электрооборудования электрических станций и

подстанций» [3]. Рассмотрены основные методы неразрушающего контроля электротехнического оборудования (тепловой, магнитный, электрический и т.д.).

В масле содержится около 70% информации о состоянии маслонаполненного оборудования. Результаты анализа масла трансформатора позволяют судить о состоянии изоляции обмоток. Выявить неисправность изоляции обмоток позволяют такие показатели качества масла как содержание водорастворимых кислот и температура вспышки в закрытом тигле [3].

Среди различных факторов, определяющих срок службы изоляции электрических машин, одним из основных является старение изоляции под действием температуры [2, стр. 19]. К электрическому методу неразрушающего контроля для диагностирования электрооборудования можно отнести метод измерения частичных разрядов (ЧР). Внешними проявлениями процессов развития ЧР являются нагрев изоляции [3].

Одним из наиболее распространенных следствий ухудшения свойств изоляции являются межвитковые замыкания. При межвитковом замыкании изоляция обмотки нарушается и происходит ее пробой между витками, что впоследствии может привести к выходу из строя трансформатора.

Основными факторами, влияющими на возникновение межвитковых замыканий в трансформаторах, являются старение изоляции (механическое, тепловое, электрическое, механическое, химическое), перенапряжения (атмосферные, внутренние, дуговые) и организация производства и эксплуатации (заводские дефекты, эксплуатационные дефекты, дефекты при капитальном ремонте).

Признаками появления межвитковых замыканий в трансформаторе могут быть срабатывание газовой защиты на отключение, аномальный нагрев трансформаторного масла, небольшое увеличение первичного тока, различное сопротивление фаз постоянному току, срабатывание дифференциальной или максимальной токовой защиты.

Межвитковые замыкания в трансформаторах, в большинстве случаев, протекают по времени медленно. Поэтому, для предотвращения серьезных поломок, важно уметь выявлять замыкания на ранних стадиях, а в идеале еще и прогнозировать остаточный срок службы изоляции. Подобный метод

диагностики позволит повысить надежность электроснабжения и сэкономить средства на ремонте оборудования.

Температура – самое универсальное отражение состояния любого оборудования. При практически любом, отличном от нормального, режиме работы трансформатора изменение температуры является самым первым показателем, указывающим на неисправное состояние.

Тепловой метод контроля позволяет, не выводя из работы трансформатор, быстро и безопасно для персонала выявить ненормальный режим работы оборудования. Однако, для этого требуется наличие довольно дорогого тепловизора либо пирометра.

В 4 номере журнала «Радио» за 1968 год [4] описан прибор, позволяющий определить короткозамкнутые витки в обмотках трансформаторов и дросселей. Описываемый прибор представляет собой генератор низких частот, собранный на двух транзисторах. Конструктивное выполнение схемы простое, что позволяет его собрать без больших материальных и временных затрат. Недостатком данного пробника является отсутствие возможности однозначного определения вида неисправности обмотки. Так нет возможности отличить межвитковое замыкание от обрыва цепи.

В 7 номере журнала «Радио» за 1990 год [5] представлена электрическая схема пробника для проверки обмотки трансформаторов и других катушек индуктивностью от 200мкГн до 2Гн. Данная схема ненамного сложнее предыдущей. Схема дает возможность однозначно определить вид неисправности – обрыв цепи или короткое замыкание.

Изменение тока намагничивания, коэффициента мощности и потерь холостого хода, дополнительные потери короткого замыкания или отличие сопротивлений обмоток трансформатора свидетельствуют о возможном появлении межвиткового замыкания. Измерение этих величин предполагает отключение нагрузки трансформатора, что нежелательно с экономической точки зрения.

Наличие короткозамкнутых витков можно определить индукционным методом. Этот метод основан на определении наличия электромагнитного поля вокруг короткозамкнутого витка, которое создается в нем индуктированным током короткого замыкания. На ряде электроремонтных предприятий применяют комплект приборов системы Порозова. Прибор обнаруживает

короткозамкнутые витки в обмотках любого диаметра и позволяет точно установить наличие и место замыкания. Однако, для выполнения данного вида диагностики требуется отключение и разборка трансформатора.

Сегодня искусственный интеллект быстро развивается, поэтому существует большое количество литературы, описывающей работу нейронных сетей и варианты применения их на практике [6, 7, 8]. В статье «Применение нейронных сетей для моделирования относительной скорости износа изоляции трансформаторного оборудования» [9] рассмотрено применение нейронных сетей для поддержания требуемой относительной скорости термического износа изоляции для продления срока службы трансформаторного оборудования за счет управления системой охлаждения. Однако, тема применения нейромоделирования для диагностики межвитковых замыканий трансформаторов в литературе не рассматривалась.

Использование данной технологии для диагностики межвитковых замыканий позволит контролировать состояние обмотки трансформатора в режиме реального времени, не выводя его из работы. Затраты на использование данной технологии невелики, а эффект существенный.

В силовых трансформаторах с масляным охлаждением межвитковое короткое замыкание обнаруживается по выделению горючего газа в газовом реле и работе реле на сигнал или отключение. В сухих трансформаторах вопрос определения замыкания между витками обмоток актуален и может привести к неплановому выходу из строя трансформатора и отключению потребителей от системы электроснабжения.

В данное повреждение может быть вызвано недостаточной изоляцией переходных соединений, продавливанием изоляции витков при опрессовке или из-за заусенцев на меди витка, механическими повреждениями изоляции, естественным износом, перенапряжениями, электродинамическими усилиями при коротких замыканиях и т.д.

По замкнутым накоротко виткам проходит ток большей силы, причем ток в фазе может лишь незначительно возрасти; изоляция витков быстро сгорает, могут выгорать сами витки, причем возможно разрушение и соседних витков. При развитии замыкания между витками обмоток может перейти в междуфазное короткое замыкание.

Если число замкнутых витков значительно, то в короткий промежуток

времени обмотки и магнитопровод сильно нагреваются. Замыкание между витками также сопровождается уменьшением сопротивления фазы, где возникло замыкание.

В качестве объекта исследования использовался однофазный трансформатор. В качестве исходных данных анализировались следующие: ток первичной и вторичной обмоток, напряжение на выходе вторичной обмотки, температура обмоток и магнитопровода. В ходе эксперимента с трансформатором под изменяющейся нагрузкой выполнялось межвитковое замыкание витков одной фазы.

Отслеживая в режиме реального времени возможные текущие сбои можно снизить количество unplanned ремонтов и отказов указанного оборудования.

При проведении экспериментальных исследований по проведению межвитковых коротких замыканий (КЗ) были предусмотрены следующие мероприятия:

- межвитковые КЗ проводились в режиме он-лайн на первичной и вторичной обмотках однофазного трансформатора с воздушным охлаждением (рисунок 2);

- КЗ выполнялось на двух-, пяти- и десяти витках;

- регистрировались с помощью приборов и датчиков следующие данные:

- напряжения и токи первичной и вторичной обмоток;

- активные, реактивные и полные мощности по высокой и низкой стороне трансформатора;

- проводилось осциллографирование и разложение по гармоникам кривых тока и напряжения;

- измерялась температура в зоне КЗ и на удалении 5 см от обмоток;

- анализировался состав окружающего воздуха на наличие частиц задымления от лака и бумажной изоляции с помощью устройства «электронный нос»;

- было произведено 500 измерений при нормальном режиме работы и от 110 до 500 измерений при межвитковом замыкании с интервалом в 1 секунду при 7 различных активных нагрузках.

- было произведено исследование межвитковых замыканий на первичной и вторичной обмотке трансформатора.

– получаемые результаты приборного учета через аналогово-цифровой преобразователь поступали на вход в программу *MATLAB* в качестве исходных данных для нейромодели с целью ее обучения и анализа информации.

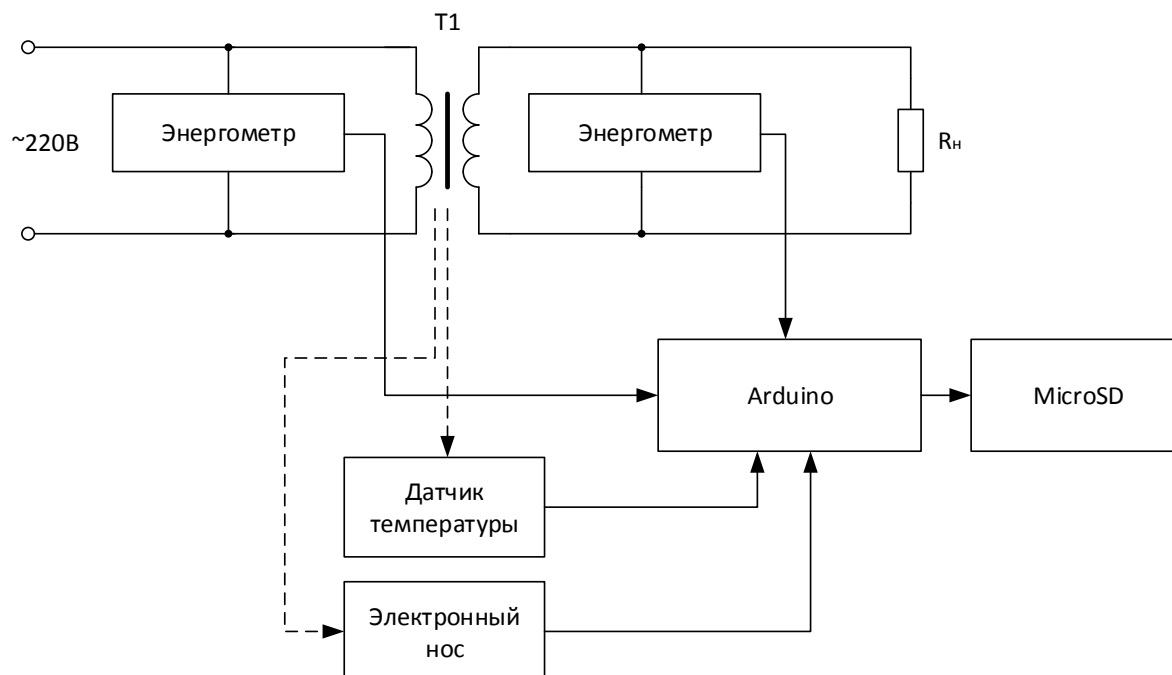


Рисунок 2 – Схема испытания трансформатора

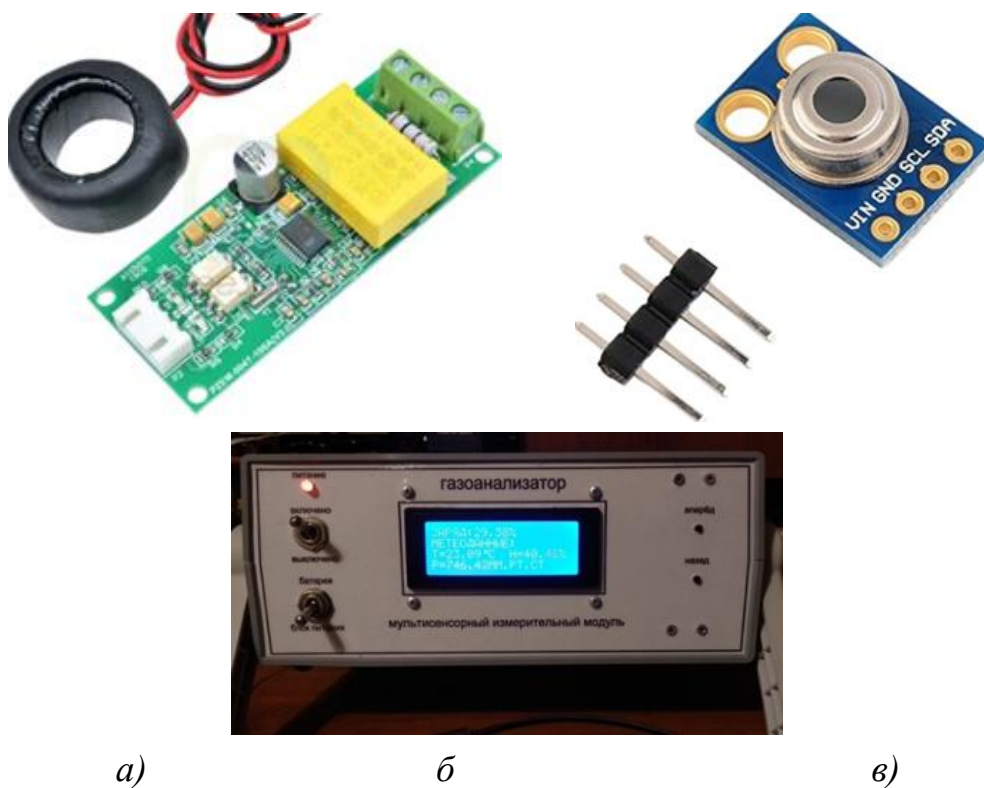


Рисунок 3 – Применяемое при эксперименте оборудование и приборы:
а – энергометр PZEM; б – датчик температуры MLX90614ESF; в – электронный нос

В результате измерений были получены следующие графики:

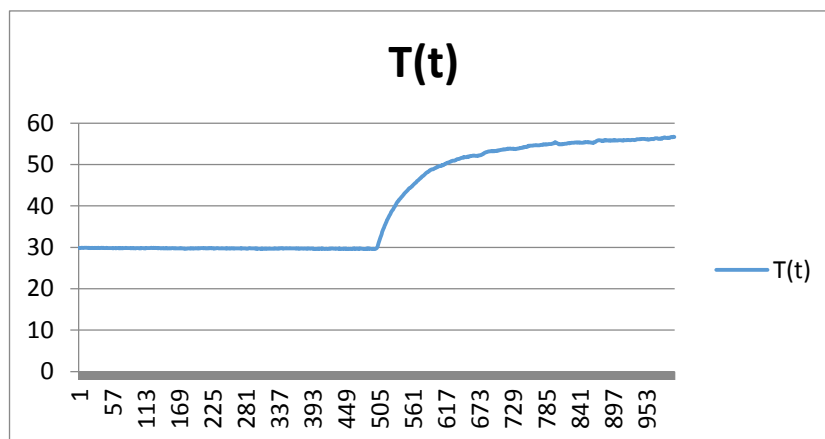


Рисунок 4 – График зависимости температуры от времени до и после межвиткового замыкания на вторичной обмотке

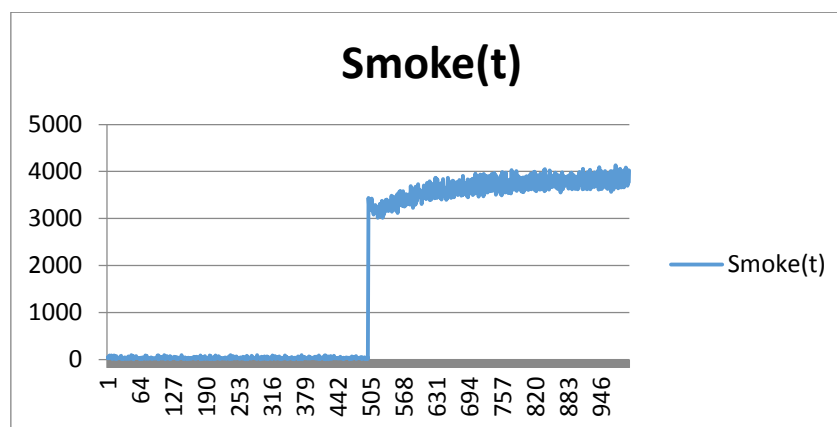


Рисунок 5 – График зависимости концентрации дыма от времени до и после межвиткового замыкания на вторичной обмотке

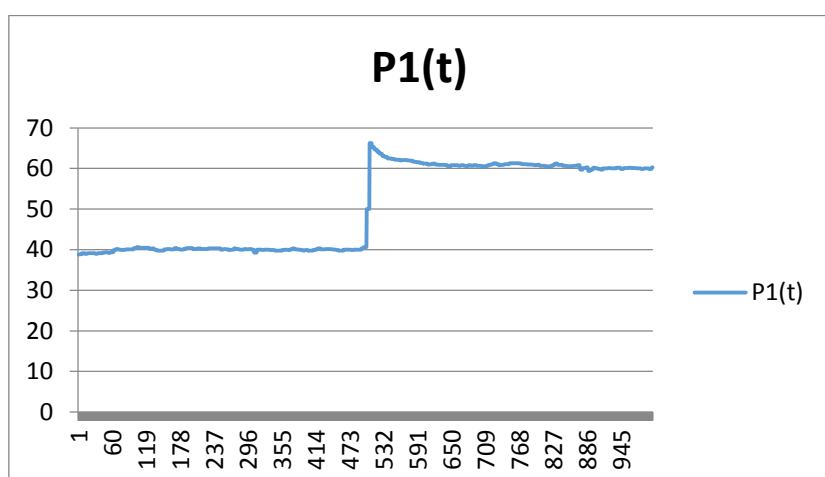


Рисунок 6 – График зависимости активной мощности на первичной обмотке от времени до и после межвиткового замыкания на вторичной обмотке

Как видно из данных графиков нестабильность сетевого напряжения сильно влияет и на остальные параметры. Поэтому для минимизации данной нестабильности необходимо анализировать не каждый параметр по отдельности, а их отношения между первичной и вторичной обмотками.

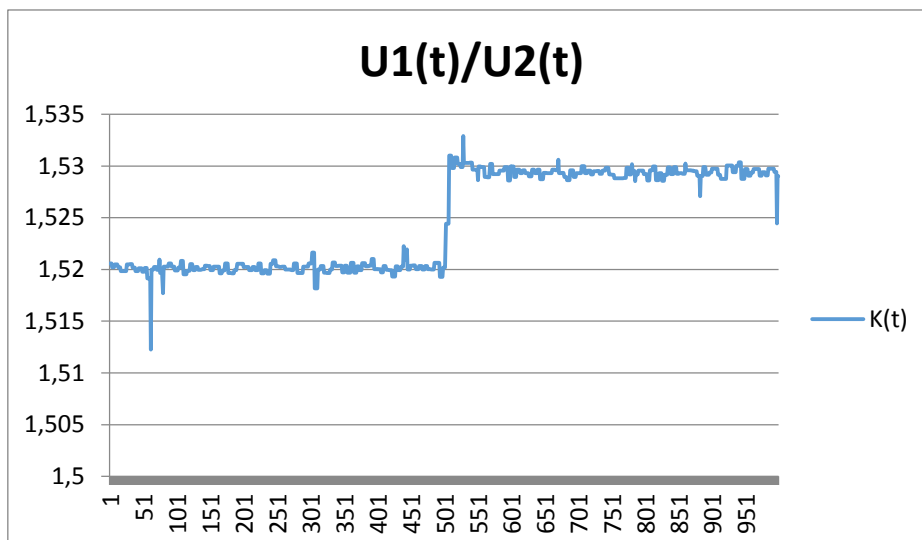


Рисунок 7 – График зависимости отношения напряжений от времени до и после межвиткового замыкания на вторичной обмотке

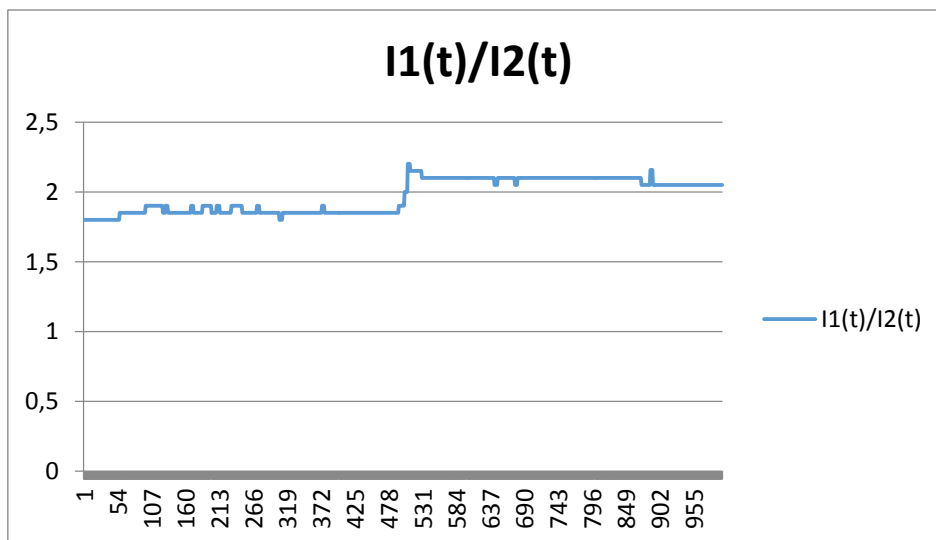


Рисунок 8 – График зависимости отношений токов от времени до и после межвиткового замыкания на вторичной обмотке

В опыте межвиткового замыкания на первичной обмотке количество измерений намного меньше из-за очень быстрого роста температуры и как следствие опасности вывода из строя обмотки трансформатора, чем при межвитковом замыкании на вторичной обмотке и нормальной работе.

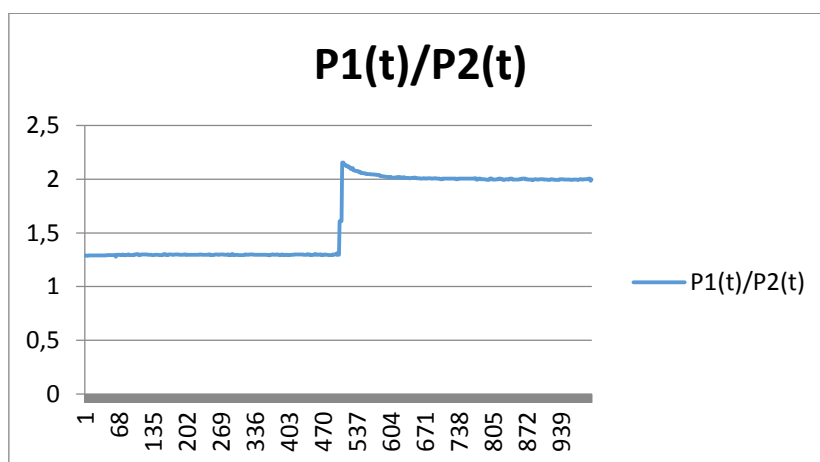


Рисунок 9 – График зависимости отношений активных от времени до и после межвиткового замыкания на вторичной обмотке

На основании графиков отношений напряжений при межвитковом замыкании в первичной или вторичной обмотках, можно сделать вывод, на какой из обмоток произошло межвитковое замыкание.

Отмечено, что в отличие от скачков сетевого напряжения график потребления активной мощности при КЗ имеет сложный характер. Он содержит минимум три составляющие экспоненты, которые соответствуют обмоткам и сердечнику.

На основании графиков отношений напряжений при межвитковом замыкании в первичной или вторичной обмотках, можно сделать вывод, на какой из обмоток произошло межвитковое замыкание.

Отмечено, что в отличие от скачков сетевого напряжения график потребления активной мощности при МКЗ имеет сложный характер. Он содержит минимум три составляющие экспоненты, которые учитывают индуктивности обмоток и сердечника (рисунок 10).

Таким образом, для однофазного трансформатора с воздушным охлаждением броневым или стержневым сердечником и классом изоляции обмоток Y и A установлено, что наиболее значимыми исходными данными для нейромодели выступали (рекомендуются) следующие:

- температура на поверхности обмоток (при межвитковых КЗ средний градиент температуры в зоне КЗ составил около $35^{\circ}\text{C}/\text{мин}$);
- отношение токов, напряжений и активных мощностей первичной и вторичной обмоток;
- состав окружающего воздуха на наличие частиц задымления от лака и бумажной изоляции.

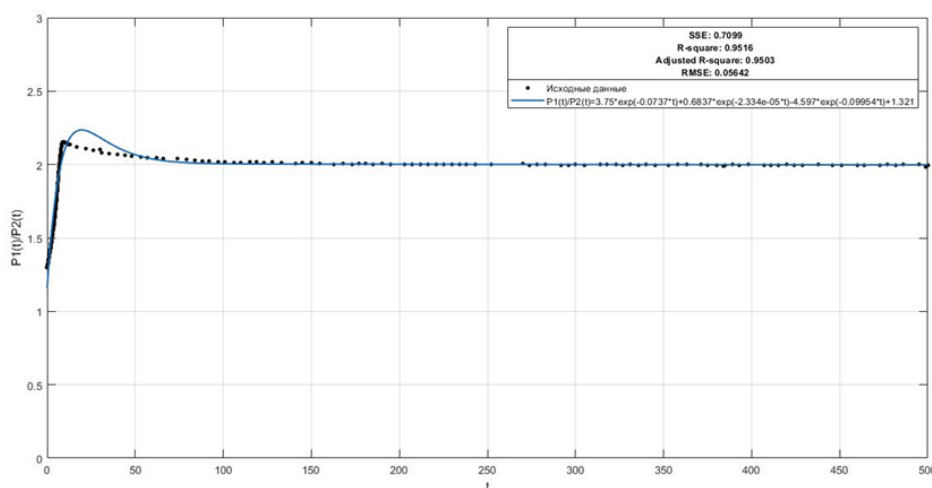


Рисунок 10 – Результаты статистического анализа в программе Statistica отношения P_1/P_2 при МКЗ

Отслеживая в режиме реального времени возможные текущие сбои можно снизить количество unplanned ремонтов и отказов указанного оборудования.

Список литературы

1. Шерьязов, С. К. Классификация факторов, влияющих на витковые замыкания в трансформаторах напряжением 6-10/0,4 кВ / С. К. Шерьязов, А. В. Пятков. – Текст : непосредственный // Вестник КрасГАУ – 2014. – №7.
2. Воробьев, В. Е. Прогнозирование срока службы электрических машин : письменные лекции / В. Е Воробьев, В. Я Кучер / Северо-Западный государственный заочный технический университет. – Санкт Петербург, 2004.– 56 с. – Текст : непосредственный.
3. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учебное пособие / А. И. Хальясмаа [и др.]. – Екатеринбург : Уральский государственный университет, 2015. – 64 с. – Текст : непосредственный.
4. Кривонос, А. В. Определение короткозамкнутых витков в обмотках трансформаторов и дроселей / А. В. Кривонос. – Текст : непосредственный // Радио – 1968. – №4 – 56 с.
5. Паздников, И. Л. Определение короткозамкнутых витков в обмотках трансформаторов и дроселей / И.Л. Паздников. – Текст : непосредственный // Радио – 1990. – №7 – с.68-69.

6. Викторова, Е. В. Применение нечетких нейронных сетей для технической диагностики дорожных машин / Е. В. Викторова. – Текст : непосредственный // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета.– 2012. – 102 с.

7. Хаханов, В.И. Применение искусственных нейронных сетей для диагностирования цифровых сетей / В.И. Хаханов, О.В. Щерба. – Текст : непосредственный // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2010. – 20 с.

8. IBMBusinessConsultingServices, Построение интеллектуальной электрической сети для передающих и распределительных энергокомпаний – Москва : – 2005. – 20 с. – Текст : непосредственный.

9. Бережной, А. В. Применение нейронных сетей для моделирования относительной скорости износа изоляции трансформаторного оборудования / А. В. Бережной, Е. Г. Дашевский. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова. – Москва, 2010.– 3 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Громыко Иван Леонидович

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ).

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

Магистр техники и технологии, ассистент
кафедры «Электротехника» БелГУТ.

Тел.: +375 (29) 377-73-25.

E-mail: ivangromyko95@mail.ru.

Галушко Виктор Николаевич

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ).

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

Кандидат технических наук, заведующий
кафедрой «Электротехника» БелГУТ.

Тел.: +375 (29) 377-73-25.

E-mail: 5355628@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Hramyka Ivan Leonidovich

Belarusian State University of Transport
(BSUT).

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

Master of Engineering and Technology,
Assistant of the Department of Electrical
Engineering BSUT.

Phone: +375 (29) 377-73-25.

E-mail: ivangromyko95@mail.ru.

Galushko Victor Nikolaevich

Belarusian State University of Transport
(BSUT).

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

Candidate of Technical Sciences, Head of the
Department of Electrical Engineering BSUT.

Phone: +375 (29) 656-23-15.

E-mail: 5355628@mail.ru.

Белькин Владислав Олегович

Белорусский государственный университет
транспорта (БелГУТ).

ул.Кирова, д. 34, г. Гомель, 246653,

Республика Беларусь.

Студент электротехнического факультета
БелГУТ.

Тел.: +375 (29) 249-48-16.

E-mail: belkina.alesya@yandex.by.

Belkin Vladislav Olegovich

Belarusian State University of Transport
(BSUT).

Kirov st., 34, Gomel, 246653,

Republic of Belarus.

Electrical Engineering Student BSUT.

Phone: +375 (29) 249-48-16.

E-mail: belkina.alesya@yandex.by.

УДК 656.07

А. А. Сальников, А. Г. Галкин

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС),
г. Екатеринбург, Российская Федерация

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

В данной статье затронута роль цифровизации в мировой экономике и железнодорожном транспорте. Продемонстрированы примеры цифровизации в частном случае на железнодорожном транспорте. Затронута проблема осуществления цифровизации на всем железнодорожном транспорте, предложены пути развития.

Ключевые слова: цифровизация, технологии, информация, диагностирование, мониторинг, цифровой локомотив, искусственный интеллект, инфраструктура, подвижной состав.

Andrey A. Salnikov, Alexandr G. Galkin

Ural State University of Railway Transport (USURT), Yekaterinburg, the Russian Federation

DIGITALIZATION OF RAILWAY TRANSPORT

This article shows the role of digitalization in the global economy and railway transport. Examples of digitalization in a particular case in railway transport are demonstrated. The problem of digitalization in all railway transport is touched upon, ways of development are proposed.

Keywords: digitalization, technology, information, diagnostics, monitoring, digital locomotive, artificial intelligence, infrastructure, rolling stock.

В ходе своего развития человечество постепенно переходило к новым формам знаний, что обусловлено естественным ходом эволюции. В настоящее время активно набирает обороты цифровизация всех систем мирового хозяйства. Цифровизация становится основой развития мировой экономики, меняя ее структуру и позволяющая существенно повысить эффективность работы различных видов производств, оборудования, технологий. Цифровые технологии широко развиваются в медицине, телекоммуникационных сферах, экономике [1], так же неизбежно внедрение и ее развитие на железнодорожном транспорте.

Данный вектор развития направляет и руководство страны, была составлена стратегия развития информационного общества в России на 2017-2030 годы, утвержденная Указом Президента РФ от 09.05.2017 г., так же в частном порядке указ о развитие цифровизации на железнодорожном транспорте в «Распоряжении Правительства РФ от 19.03.2019 № 466-р Об утверждении программы развития ОАО "РЖД" до 2025 года».

Основное внимание в развитии технологий управления на железнодорожном транспорте сконцентрировано на автоматизации технологических процессов, получения цифровых объектов технических систем, снижения влияния человеческого фактора на процессы производства [2]. Оцифровка информации позволяет в автоматическом режиме организовывать процесс ее сбора и применять методы ее математической обработки и анализа. Для быстрого сбора и обработки информации требуются современные технологические и методические базы: высокоскоростные линии оптоволоконной связи, автоматизированные микропроцессорные системы управления, разработанные принципиально новые алгоритмы и технологические программы, в том числе с использованием искусственного интеллекта.

Стратегия цифровизации позволяет внедрять системы беспилотного движения. Такие технологии проходят апробацию уже 3 года на станции Лужская Октябрьской магистрали, где управление маневровыми локомотивами осуществляется в беспилотном режиме через диспетчерский пункт. Еще один пример опытной эксплуатации беспилотного движения запущен на Московском центральном кольце, где с 2019 году эксплуатируются электропоезда «Ласточка». [4-5]

Еще один пример внедрения цифровых технологий, запущен пилотный блокчейн-проект на базе одной цифровой платформы, он позволил объединить собственников вагонного парка, вагоноремонтные предприятия и ОАО РЖД. Что помогло повысить прозрачность сделок и качества услуг, а так же сократить время поиска запчастей.

Для логистического рынка ведется внедрение цифровой биржи вагонов, единого информационного пространства грузовых перевозок и логистики. В IT сфере в ОАО РЖД уже реализован запуск электронной торговой площадки «Грузовые перевозки»[4].

По данному пути активно следуют сервисные компании и производители тяговых подвижных составов, но совершенствование идет параллельно и в разрыве друг от друга [3].

Цифровизация и интеллектуализация должна охватывать три основных составляющих перевозочного процесса

- Технологические средства инфраструктуры;
- Подвижной состав;
- Организацию перевозок.

Для совершенствования технологий управлений необходимо создание единого комплекса на базе цифровой инфраструктуры, интеллектуальной диспетчеризации, цифрового локомотива и объединением их в общую систему.

Так же необходимо уделить внимание внедрению искусственного интеллекта. Его внедрение позволит исключить человеческий фактор при реагировании во время не штатных ситуациях, что позволит повысить безопасность движения.

Для реализации концепции цифровой железной дороги выделяют следующие этапы задач, требующие их решения [2,6]:

- Развитие информационно-цифрового обмена между цифровым локомотивом и цифровой инфраструктурой;
- Развитие технологий автоматического построения графика движения поездов, автоведения, автодиспетчера, с помощью цифровых моделей и введения самообучающихся программ;
- Внедрения датчиков мониторинга подвижного состава и связи с объектами инфраструктуры;

- Повышение степени взаимодействия объектов железнодорожной инфраструктуры;
- Внедрение автоматизированных комплексов управления движением электроподвижных составов на базе цифровой инфраструктуры.

Что касается автоматизации процесса движения поездов, то предлагается следующие направления развития [2]:

- Разработка систем автоведения и беспилотного управления локомотивом;
- Разработка систем интервального регулирования на базе спутниковой передачи данных и радиоканала;
- Разработка систем диагностирования с системой online анализа данных подвижного состава и инфраструктуры, с последующим прогнозированием их состояний.
- Внедрение искусственного интеллекта и нейронных сетей в систему автоматического управления движением поездов.

Следовательно, для развития железнодорожной цифровизации необходим сбор данных состояния каждой составляющей этой системы, совершенствование и интеллектуализация систем диагностирования и мониторинга. Для этого требуется массовое внедрение дискретных и аналоговых датчиков передающих техническое состояние объектов инфраструктуры и подвижного состава. А процесс оперативного диагностирования и мониторинга должен быть автоматическим, на базе искусственного интеллекта.

Возможность использования таких диагностических систем, передающие и анализирующие данные в реальном времени и организация их взаимодействия, позволят осуществить внедрение общей цифровизации железнодорожного транспорта. На данном этапе имеются положительные примеры внедрения и совершенствования цифровизации на объектах инфраструктуры, подвижного состава и систем организации перевозок, но оно идет параллельно без общего взаимодействия. И для решения этой проблемы необходимо создание единого комплекса цифровой инфраструктуры, опираясь на предложенные направления развития.

Научный руководитель – д.т.н., А. Г. Галкин, УрГУПС.

Список литературы

1. Смирнов, Е. Н. Эволюция инновационного развития и предпосылки цифровизации и цифровых трансформаций мировой экономики / Е. Н. Смирнов. – Текст : непосредственный // Вопросы инновационной экономики. – 2018. – №4. – 554 с.
2. Романчиков, А. М. Цифровизация железнодорожного транспорта в России / А. М Романчиков, В. А. Гросс, Д. В. Ефанов, А. Ю. Васильев. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – №6. – С. 10-13.
3. Розенберг, Е. Н. О стратегии развития цифровой железной дороги / Е. Н. Розенберг, В. В Батраев. – Текст : непосредственный // Бюл. Объединения ученого совета ОАО «РЖД». – 2018. – №1. – С. 9-27.
4. Сулла, А. Цифровизация на железнодорожном транспорте / А. Сулла. – Текст : электронный // РЖД-Партнер : сайт. – URL: <https://www.rzd-partner.ru/logistics/opinions/tsifrovizatsiya-na-zheleznodorozhnom-transporte-eto-deystvitelno-udobno> (дата обращения: 15.10.2020).
5. Ленский, И. Стратегия цифровизации / Ленский И. – Текст : электронный // Журнал Гудок. – 2019. – №19. – URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1452372&archive=2019.02.06> (дата обращения: 15.10.2020).
6. Розенберг, Е. Н. Цифровая железная дорога-ближайшее будущее / Е. Н.Розенберг. – Текст : непосредственный // Автом., связь, информ. – 2016. – №10. – С 4-7.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сальников Андрей Александрович
Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС).
Колмогорова ул., 66, г. Екатеринбург,
620034, Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электроснабжение
транспорта» УрГУПС.
Тел.: +7 9961738528.
E-mail: pc_salnikov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Salnikov Andrey Alexandrovich
Ural State University of Railway
Transport (USURT).
Kolmogorova st., 66, Yekaterinburg, 620034,
the Russian Federation
Postgraduate student of the department "
Transport power supply " USURT.
Phone: +7 9961738528.
E-mail: pc_salnikov@mail.ru

Галкин Александр Геннадьевич
Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС).
Колмогорова ул., 66, г. Екатеринбург,
620034, Российская Федерация.
Ректор Уральского государственного
университета путей сообщения, доктор
технических наук УрГУПС.
Тел.: (343) 221-24-44.
E-mail: rector@usurt.ru.

Galkin Alexandr Gennadievich
Ural State University of Railway
Transport (USURT).
Kolmogorova st., 66, Yekaterinburg, 620034,
the Russian Federation
Rector of the Ural State University of
Railway transport, Doctor of Technical
Sciences USURT.
Phone: (343) 221-24-44.
E-mail: rector@usurt.ru.

УДК 621.311.001

С. Н. Чижма, С. В. Молчанов, И. В. Стригин

Балтийский федеральный университет им. И. Канта (БФУ им. И. Канта),
г. Калининград, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ УРАВНИТЕЛЬНОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОННО-ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Развитие технологии синхронно-векторных измерений позволяет контролировать с высокой точностью процессы в территориально распределенных системах, например, в системах тягового электроснабжения. В работе описана технология и алгоритм определения величины уравнительного тока в системе с двусторонним питанием, проведены эксперименты по оценке точности определения составляющих уравнительного тока.

Ключевые слова: синхронно-векторные измерения, система тягового электроснабжения, уравнительный ток, схема замещения.

Sergey N. Chizhma, Sergey V. Molchanov, Igor V. Strigin

Baltic Federal University of Immanuel Kant (IKBFU), Kaliningrad, the Russian Federation

THE DETERMINATION OF THE COMPONENTS OF THE SURGE CURRENT USING A SYNCHRONOUS VECTOR MEASURING

The development of synchronous vector measurement technology makes it possible to control with high accuracy fast-moving processes in geographically distributed systems, for

example, in electric power systems. The paper presents the technology and algorithm for calculating the parameters of the power line, virtual and physical experiments to assess the accuracy of determining the parameters of the power line.

Keywords: synchronous phasor measurement, the system of traction power supply, surge current, equivalent circuit.

При двустороннем питании тяговой сети переменного тока на шинах смежных тяговых подстанций практически всегда имеется неравенство питающих напряжений по модулю и фазе, что приводит к протеканию в тяговой сети тока, называемого уравнительным. Уравнительные токи протекают практически по всем зонам с двусторонним питанием независимо от того, имеется нагрузка в межподстанционной зоне или нет. Протекая по тяговой сети, уравнительный ток создает дополнительные потери электроэнергии.

Задача снижения потерь от уравнительного тока является комплексной задачей, включающей в себя рассмотрение вопросов обнаружения и измерения уравнительного тока, разработку приборов, позволяющих производить такие замеры, а также разработку методов снижения потерь от уравнительного тока.

Настоящая работа посвящена разработке метода определения составляющих уравнительного тока с использованием синхронно-векторных измерений на основе системы синхронизации на базе ГЛОНАСС/GPS [1].

Структурная схема системы для определения составляющих уравнительного тока в тяговой цепи представлена на рисунке 1. На концах тяговой сети устанавливаются измерители токов и напряжений (ТПА-02), которые синхронизируются от спутников с помощью модулей синхронизации ИСС-1.3 [2]. Погрешность синхронизации составляет не более 1 мкс.

Маркированные по времени значения напряжений и токов передаются на сервер, где вычисляются составляющие уравнительного тока.

В общем случае в режиме отсутствия тяговой нагрузки межподстанционная зона может быть представлена пассивным четырехполусником с замкнутой стороной (рисунок 2) [3]. При этом условии для выделения расчетного участка из электроэнергетической системы достаточно знать значения двух независимых источников напряжений $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$,

так как в расчетных схемах замещения тяговой сети с достаточно высоким приближением принято считать потенциалы точек $1'$ и $2'$ равными.

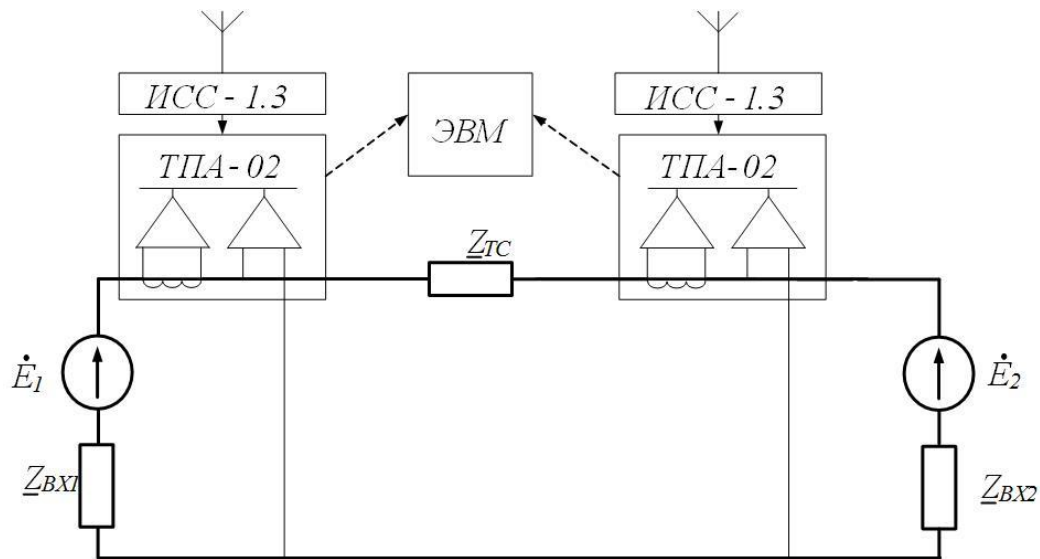


Рисунок 1 – Структурная схема системы для определения составляющих уравнительного тока

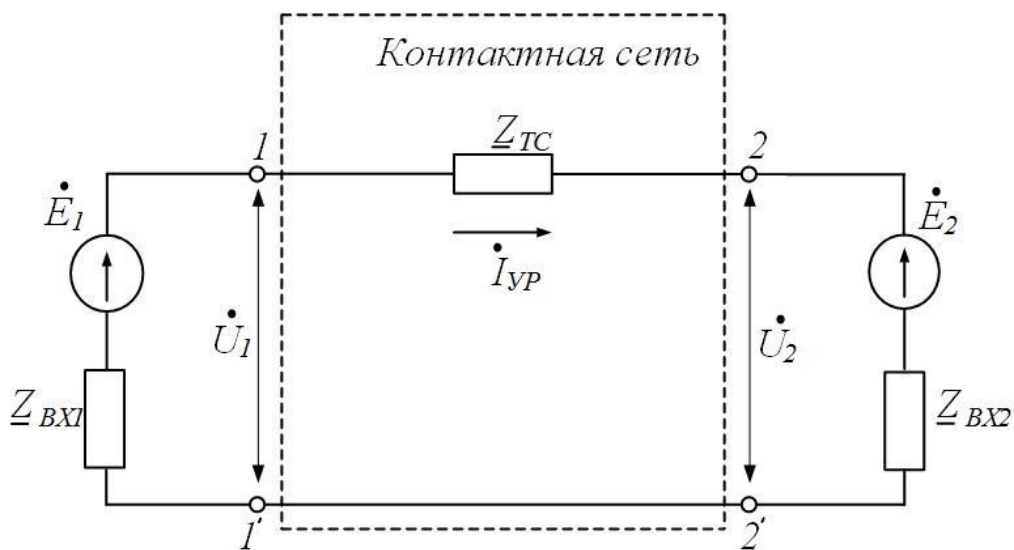


Рисунок 2 – Схема замещения контактной линии при двустороннем однопроводном питании

На рисунке 2 приняты следующие обозначения:

$\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2$ – ЭДС холостого хода фазы, питающей межподстанционную зону на смежных тяговых подстанциях;

$\underline{Z}_1$ и $\underline{Z}_2$ – входное комплексное сопротивление питающей системы по отношению к тяговому трансформатору на подстанциях;

$\underline{Z}_{TC}$ – эквивалентное комплексное сопротивление тяговой сети;

$\dot{I}_{yp}$ – комплексное действующее значение уравнительного тока;

$\dot{U}_1 u \dot{U}_2$ – комплексное действующее значение напряжения на шинах тяговой подстанции фазы, питающей межподстанционную зону на смежных тяговых подстанциях.

Приведем сопротивления источников питания к сопротивлению линии

$$\underline{Z} = \underline{Z}_{TC} + \underline{Z}_{BX1} + \underline{Z}_{BX2}. \quad (1)$$

Уравнительный ток определяется разностью напряжений источников на концах контактного провода и общим сопротивлением линии Z :

$$\dot{I}_{yp} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{\underline{Z}}, \quad (2)$$

где $\dot{I}_{yp} = I_{yp} e^{j\phi}$.

Комплексное сопротивление тяговой сети состоит из активной и индуктивной составляющей: $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$, $\phi_A = \arctg X_L / R$. Величину активного и реактивного сопротивления можно взять, например, из справочника [4] или определить опытным путем, используя то же оборудование, что показано на рисунке 1. Для примера, активное сопротивление однопутного участка контактной сети, выполненной проводом МФ-100, составляет 0,19 Ом*км, индуктивность – $1,588 \cdot 10^{-3}$ Гн*км.

Уравнительный ток состоит из двух составляющих [5]:

$\dot{I}_{ypA}$ – амплитудная (продольная) составляющая, определяемая при разности напряжений на концах контактной сети и нулевом сдвиге фаз $U_1 \neq U_2, \alpha_1 = \alpha_2$;

$\dot{I}_{yp\phi}$ – фазовая (поперечная) составляющая, определяемая сдвигом фаз напряжений на концах контактной сети $U_1 = U_2, \alpha_1 \neq \alpha_2$.

Задача заключается в определении амплитудной и фазовой составляющих уравнительного тока с целью их минимизации с помощью фазоповоротных трансформаторов, поперечных и продольных емкостных компенсаторов. С помощью синхронно-векторных измерений можно определить величины $U_1, U_2, \alpha_1, \alpha_2, I_{yp}, \phi$.

Так как напряжения – векторные величины, то $\dot{U}_1 = U_1 e^{j\alpha_1}$ и уравнильный ток определяется как:

$$\dot{I}_{yp} = \frac{U_1 e^{j\alpha_1} - U_2 e^{j\alpha_2}}{\underline{Z}}. \quad (3)$$

Преобразуем числитель выражения к тригонометрической форме:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 - \dot{U}_2 &= U_1(\cos\alpha_1 + j\sin\alpha_1) - U_2(\cos\alpha_2 + j\sin\alpha_2) = \\ &= U_1\cos\alpha_1 - U_2\cos\alpha_2 + j(U_1\sin\alpha_1 - U_2\sin\alpha_2). \end{aligned}$$

Приведем числитель к двум слагаемым:

$$A = U_1\cos\alpha_1 - U_2\cos\alpha_2; B = U_1\sin\alpha_1 - U_2\sin\alpha_2. \quad (4)$$

Установим напряжение на левом конце контактной сети как опорное, в таком случае все фазы будут определяться относительно этого напряжения. При этом $\alpha_1=0$, $\sin\alpha_1=0$, $\cos\alpha_1=1$. В этом случае составляющие A и B будут определяться как:

$$A = U_1 - U_2\cos\alpha_2; B = -U_2\sin\alpha_2. \quad (5)$$

В соответствии с правилами представления векторных величин, модуль и фаза уравнильного тока определим в соответствии с известной формулой:

$$I = \sqrt{RE^2 + IM^2}, \phi = \arctg \frac{IM}{RE}. \quad (6)$$

Соответственно, амплитуда уравнильного тока равна:

$$\begin{aligned} I_{yp} &= \frac{\sqrt{(U_1 - U_2\cos\alpha_2)^2 + (-U_2\sin\alpha_2)^2}}{\underline{Z}} = \\ &= \frac{\sqrt{U_1^2 - 2U_1U_2\cos\alpha_2 + U_2^2\cos^2\alpha_2 + U_2^2\sin^2\alpha_2}}{\underline{Z}} = \\ &= \frac{\sqrt{U_1^2 - 2U_1U_2\cos\alpha_2 + U_2^2(\cos^2\alpha_2 + \sin^2\alpha_2)}}{\underline{Z}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Поскольку $\cos^2\alpha_2 + \sin^2\alpha_2 = 1$, это выражение запишем в виде:

$$I_{yp} = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2\cos\alpha_2}}{\underline{Z}}. \quad (8)$$

Фаза будет определяться как:

$$\phi = \arctg \frac{-U_2\sin\alpha_2}{U_1 - U_2\cos\alpha_2}. \quad (9)$$

Проведем сравнительный анализ полученных выражений, используя представленные формулы. Для сравнения проведем моделирование схемы электроснабжения с помощью пакета схемотехнического моделирования Multisim [6].

На рисунке 3 представлена схема моделирования, на рисунке 4 показаны временные диаграммы напряжений и токов в схеме.

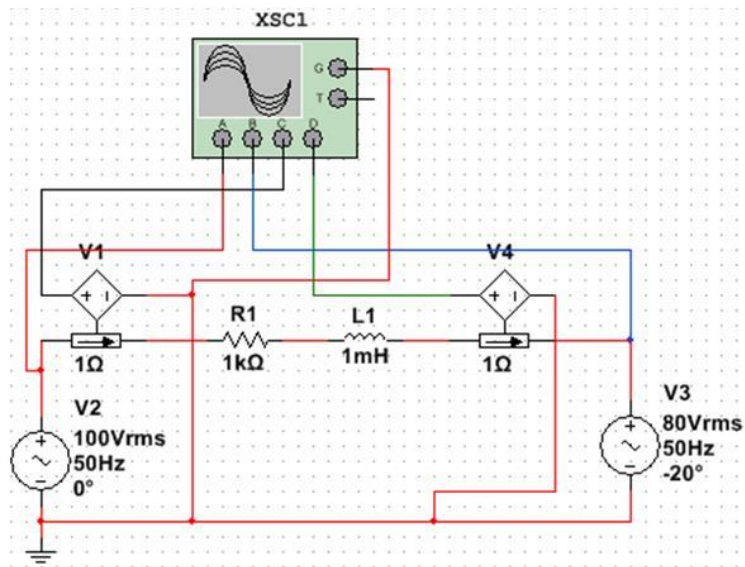


Рисунок 3 – Схема моделирования линии электроснабжения

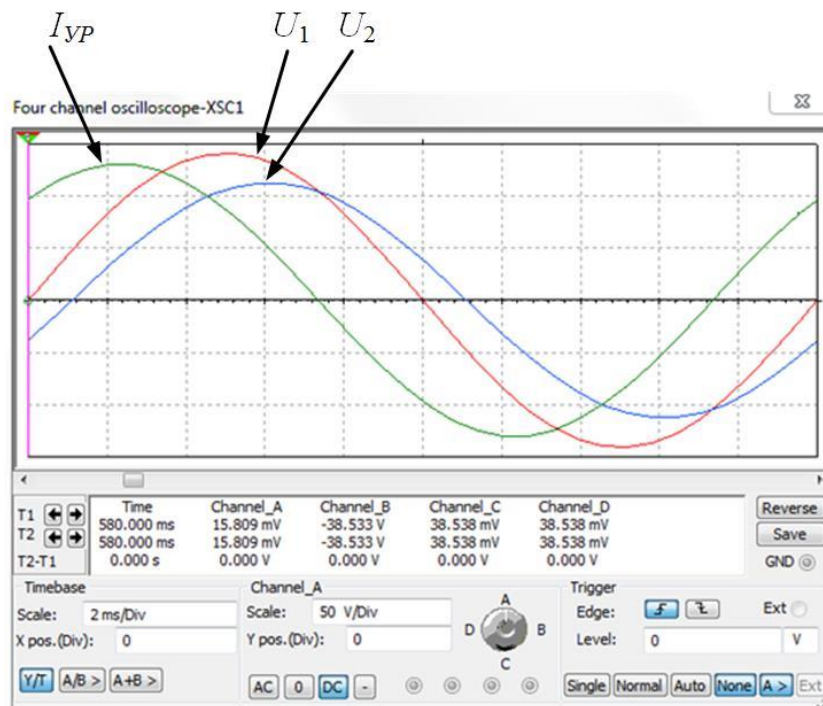


Рисунок 4 – Временные диаграммы напряжений на концах линии и уравнительного тока

Проведем моделирование и расчет для трех случаев:

1. Присутствует только амплитудная составляющая уравнительного тока $\dot{I}_{yPA}$ ($U_1 \neq U_2, \alpha_1 = \alpha_2$). В этом случае ток сдвинут относительно U_1 на величину ϕ_A за счет индуктивного сопротивления линии. При дальнейших расчетах будем вычитать из измеренных значений фаз различных составляющих токов значение ϕ_A ;
2. Присутствует только фазовая составляющая $\dot{I}_{yP\Phi}$ ($U_1 = U_2, \alpha_1 \neq \alpha_2$);
3. Уравнительный ток $\dot{I}_{yP}$ состоит из амплитудной и фазовой составляющих ($U_1 \neq U_2, \alpha_1 \neq \alpha_2$).

Расчет и схемное моделирование проводится для значений напряжений и токов: $U_1=100\text{В}$, $U_2=80\text{В}$, $\alpha_2=20^\circ$. Сравнительные результаты расчетов и моделирования представлены в таблице 1.

Для нахождения амплитудной и фазной составляющих уравнительного тока составим векторные диаграммы для трех режимов (рисунки 5...7).

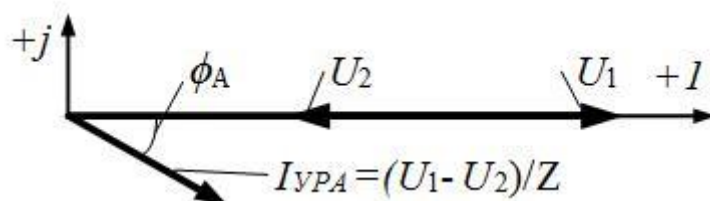


Рисунок 5 – Векторная диаграмма для определения амплитудной составляющей уравнительного тока

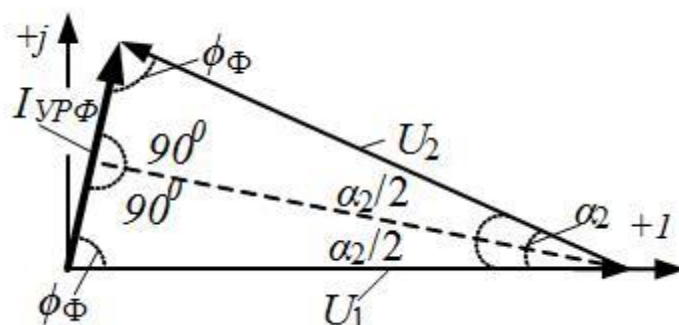


Рисунок 6 – Векторная диаграмма для определения фазовой составляющей уравнительного тока

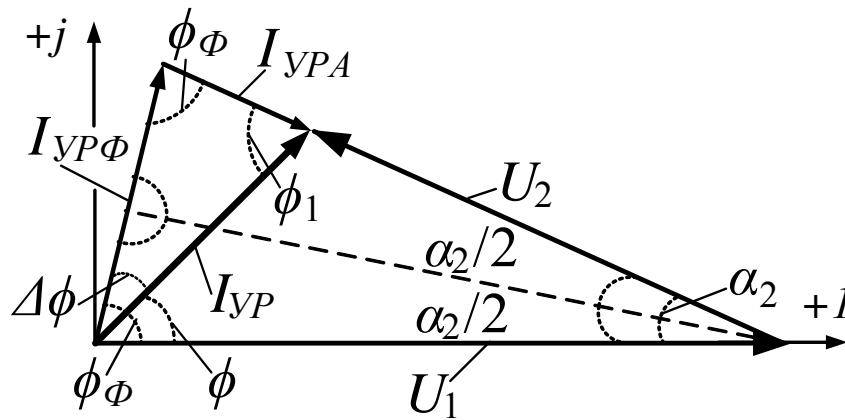


Рисунок 7 – Векторная диаграмма для определения уравнивающего тока

Векторная диаграмма, приведенная на рисунке 7, позволяет по измеренным значениям $I_{ур}$, φ , α_2 , U_1 и U_2 определить амплитудную и фазовую составляющие уравнивающего тока, а также фазу фазовой составляющей уравнивающего тока.

Исходя из того, что треугольник на рисунке 6 – равнобедренный, два угла будут равны между собой и определяться как:

$$\phi_{\phi} = 90^{\circ} - \alpha_2 / 2. \quad (10)$$

Соответственно, разность двух углов будет равна

$$\Delta\phi = \phi_{\phi} - \phi = 90^{\circ} - \alpha_2 / 2 - \phi. \quad (11)$$

Третий угол в треугольнике токов на рисунке 7 определим как

$$\phi_1 = 180^{\circ} - \Delta\phi - \phi_{\phi}. \quad (12)$$

Для выражений (10...12) величина $\varphi = \varphi_{изм} - \varphi_A$, где $\varphi_{изм}$ – значение фазы уравнивающего тока, измеренное с помощью инструментальных средств.

Зная все углы в треугольнике токов на рисунке 7 и величину уравнивающего тока, можно рассчитать фазовую и амплитудную составляющие уравнивающего тока.

$$I_{ур\phi} = I_{ур} \frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_{\phi}}; I_{урA} = I_{ур\phi} \frac{\sin \Delta\phi}{\sin \phi_1}. \quad (13)$$

Результаты моделирования в соответствии со схемой, показанной на рисунке 3, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчета и моделирования токов и напряжений в цепи

Параметр	Обозначение	Эксперимент	Расчет по схеме	Расчет по векторам
Уравнительный ток, мА	i_{yp}	36	36	36
Фаза уравнительного тока, град.	ϕ	47	47,7	47,4
Амплитудная составляющая уравнительного тока, мА	i_{ypA}	20	20,7	20,3
Фаза амплитудной составляющей уравнительного тока, град.	ϕ_A	0	0	0
Фазовая составляющая уравнительного тока, мА	$i_{yp\phi}$	34	33,8	33,9
Фаза фазовой составляющей уравнительного тока, град.	ϕ_ϕ	80	80	80

Заключение: используя современные спутниковые системы синхронизации на базе ГЛОНАСС/GPS и современное оборудование для синхронно-фазовых измерений, а также используя методику, описанную в настоящей работе, можно определять фазовые сдвиги напряжений на смежных тяговых подстанциях и, соответственно измерять амплитудную и фазовую составляющие уравнительного тока. Знание этих параметров открывает дорогу для создания систем минимизации уравнительных токов, что значительно сократит потери электроэнергии в системах тягового электроснабжения.

Список литературы

1. Phadke, A. G. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications / A. G. Phadke, J. S. Thorp. – Springer, 2008. – 254 p. – Text: direct.
2. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт, 1982. – 578 с. – Текст: непосредственный.
3. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.1. / под. ред. К. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт, 1980. – 256 с. – Текст: непосредственный.
4. Железко, Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях : Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 176 с. – Текст: непосредственный.

5. Хернтер, М. Е. Электронное моделирование в Multisim / М. Е. Хернтер.
– Москва : ДМК Пресс, 2010. – 501 с. – Текст: непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чижма Сергей Николаевич

Балтийский федеральный университет
им. И Канта (БФУ им. И. Канта).

ул. А. Невского, д.14, г. Калининград,
246029, Российская Федерация.

Доктор технических наук, доцент, профессор
института физико-математических наук и
информационных технологий.

Тел. 8-963-295-0841.

E-mail: chisn@yandex.ru

Молчанов Сергей Васильевич

Балтийский федеральный университет
им. И Канта (БФУ им. И. Канта).

ул. А. Невского, д.14, г. Калининград,
246029, Российская Федерация.

Кандидат физико-математических, доцент,
доцент института физико-математических
наук и информационных технологий,
Тел. 8-909-775-4635.

E-mail: SMolchanov@kantiana.ru

Стригин Игорь Валентинович

Балтийский федеральный университет
им. И Канта (БФУ им. И. Канта).

ул. А. Невского, д.14, г. Калининград,
246029, Российская Федерация.

аспирант института физико-математических
наук и информационных технологий .

Тел. 8-911-483-8864.

E-mail: IStrigin@kantiana.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTORS

Chizhma Sergey Nikolaevich

Baltic Federal University
of Immanuel Kant (IKBFU).

14, A. Nevskogo, Kaliningrad, 246029,
the Russian Federation.

Doctor of Technical Science, docent, professor
of Institute of physical and mathematical
Sciences and information technologies.

Phone: 8-963-295-0841.

E-mail: chisn@yandex.ru

Molchanov Sergey Vasilievich

Baltic Federal University
of Immanuel Kant (IKBFU).

14, A. Nevskogo, Kaliningrad, 246029,
the Russian Federation.

Candidate of physical and mathematical
Sciences, docent, docent of Institute
of physical and mathematical Sciences
and information technologies.

Phone: 8-909-775-4635.

E-mail: SMolchanov@kantiana.ru

Strigin Igor Valentinovich

Baltic Federal University
of Immanuel Kant (IKBFU).

14, A. Nevskogo, Kaliningrad, 246029,
the Russian Federation.

Post-graduate student of Institute
of physical and mathematical Sciences
and information technologies.

Phone: 8-911-483-8864.

E-mail: IStrigin@kantiana.ru.

В. С. Лысенко

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ ОБМОТКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ К ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ НАГРУЗКИ НА ВАЛУ

В статье рассматривается способ подключения трехфазного асинхронного двигателя к однофазной сети, при условии создания на обмотке симметричной системы напряжений, сформированной при различных значениях нагрузки на валу. Выполнен расчет действующих значений токов и напряжений фаз асинхронного двигателя при различной загрузженности двигателя, построены векторные диаграммы.

Ключевые слова: однофазная сеть, трехфазный двигатель, преобразователь числа фаз, система симметричного трехфазного напряжения.

Victor S. Lysenko

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

MODELING THE SCHEME OF CONNECTING A THREE-PHASE INDUCTION MOTOR WITH TO A SINGLE-PHASE NETWORK AT DIFFERENT VALUES OF THE SHAFT LOAD

The article discusses a method for connecting a three-phase induction motor to a single-phase network, provided that a symmetrical voltage system is created on the winding that is resistant to changes in the load on the shaft. The currents and voltages values of the induction motor phases are calculated at different load, vector diagrams are constructed.

Keywords: single-phase network, three-phase induction motor, phase converter, symmetrical three-phase voltage.

Проблема подключения трехфазного асинхронного двигателя к однофазной сети впервые была обозначена в 30-х годах XX века при широкомасштабной электрификации объектов сельского хозяйства и лесной

промышленности. Для того периода была характерна однофазная система электроснабжения, что послужило импульсом для разработки преобразователей числа фаз [1-3].

Существует большое количество разнообразных устройств и схем, обеспечивающих в той или иной мере запуск и устойчивую работу трехфазного асинхронного двигателя от однофазной сети [1-6]. Основными недостатками существующих схем и устройств являются создание трехфазной системы напряжений на статорной обмотке асинхронного двигателя, восприимчивой к изменениям нагрузки на валу [1-4].

Несимметричная система трехфазного напряжения негативно влияет на механические и энергетические характеристики асинхронной машины. В частности приводит к снижению момента двигателя, уменьшению КПД, росту потерь, дополнительному нагреву машины и сокращению срока службы двигателя [2,3]. Таким образом, совершенствование устройств и схем, создающих симметричную систему напряжений на статорной обмотке асинхронного двигателя при подключении к однофазной сети остается весьма актуальной темой для научных исследований.

Рассмотрим схему, формирующую симметричное трехфазное напряжение на трехфазной обмотке статора асинхронного двигателя подключенного к однофазной сети [7]. С использованием схемы замещения (рисунок 1), выполним анализ напряжений трехфазной обмотки статора, соединенной в схему «треугольник», при различных значениях нагрузки на валу двигателя.

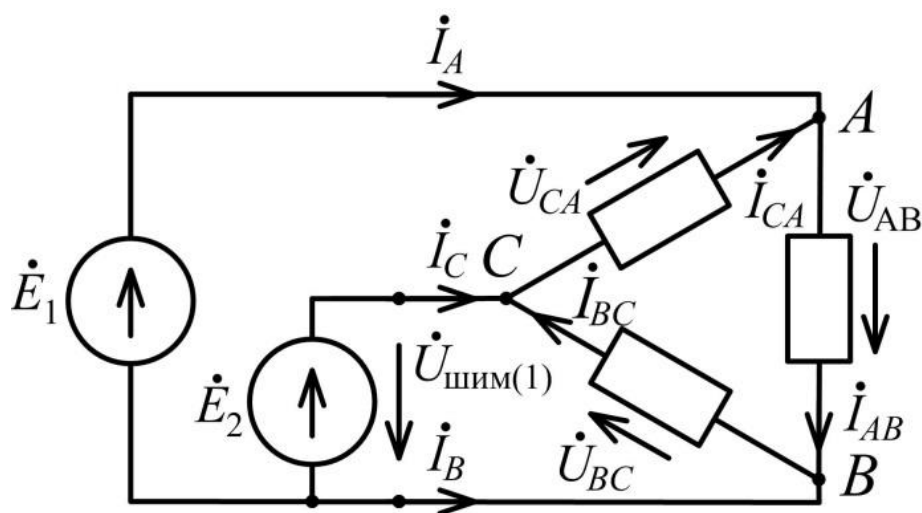


Рисунок 1 – Схема замещения трехфазной статорной обмотки асинхронного двигателя, подключенного к однофазной сети

Для создания симметричной трехфазной системы напряжения на обмотке статора необходимо, к предварительно соединенной в треугольник обмотке, подключить два источника синусоидальной ЭДС. Амплитуды ЭДС равны между собой, синусоиды смещены по фазе друг относительно друга на 60 градусов. В этом случае на статорной обмотке образуется трехфазное симметричное напряжение.

Каждая фаз асинхронного двигателя представлена при помощи Г-образной схемы замещения и ее эквивалентной схемы (рисунок 2).

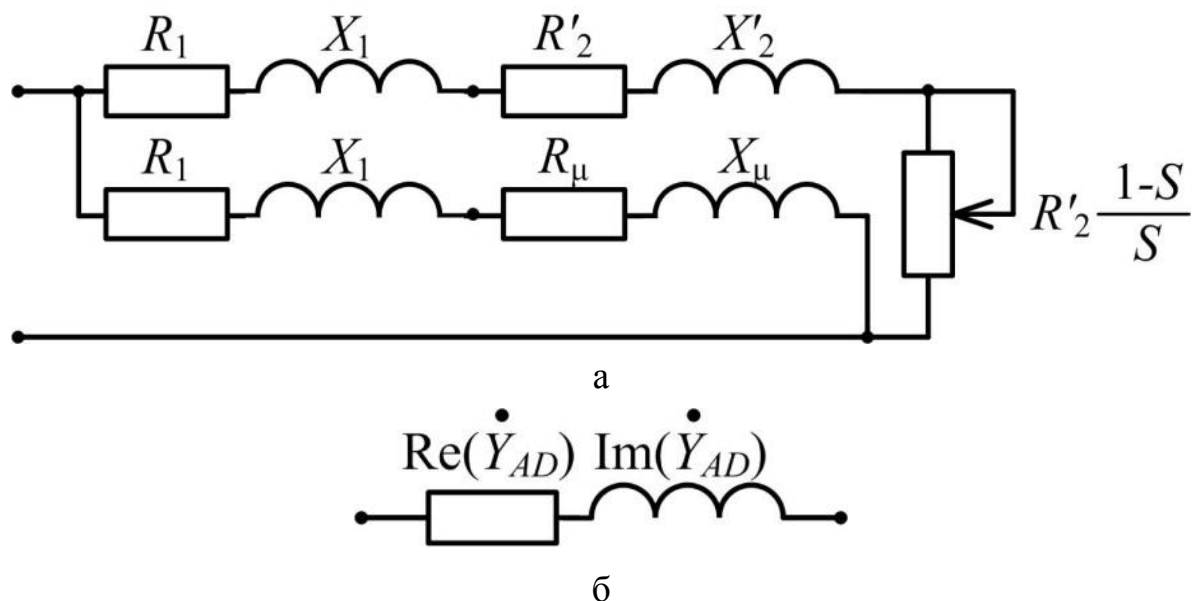


Рисунок 2 – Г-образная схема замещения асинхронного двигателя (а) и эквивалентная схема (б)

Для расчета действительной и мнимой составляющих эквивалентной комплексной проводимости фазы асинхронного двигателя в зависимости от скольжения из схемы замещения получаем следующие выражения:

$$\text{Re}(\dot{Y}_{AD}(S)) = \frac{R_1 + R_\mu}{(R_1 + R_\mu)^2 + (X_1 + X_\mu)^2} + \frac{R_1 + \frac{R'_2}{S}}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X_\mu)^2}; \quad (1)$$

$$\text{Im}(\dot{Y}_{AD}(S)) = \frac{X_1 + X_\mu}{(R_1 + R_\mu)^2 + (X_1 + X_\mu)^2} - \frac{X_1 + X'_2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}. \quad (2)$$

В таблице 1 приведены параметры Г-образной схемы замещения фазы асинхронного двигателя типа 4A80B4Y3 [8].

Таблица 1

Параметры асинхронного двигателя типа 4А80В4У3

P_{2H} , кВт	η_H , о.е.	$\cos\varphi_{1H}$, о.е.	S_H , о.е.	Параметры схемы замещения, Ом					
				R_μ	X_μ	R_1	X_1	R'_2	X'_2
1,5	0,77	0,83	0,067	17,64	117,54	7,42	4,83	4,14	7,42

Исследуем формирование системы трехфазного напряжения при ступенчатом изменении нагрузки на валу. Скольжение для различных значений мощности на валу машины определено при помощи рабочих характеристик. Для дальнейшего расчета примем, скольжение равное 0,01, 0,022, 0,037, 0,067 при нагрузке на валу асинхронной машины $0,25P_{2H}$, $0,5P_{2H}$, $0,75P_{2H}$ и P_{2H} соответственно.

В результате расчета получены действующие значения токов и напряжений обмотки статора асинхронного двигателя, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчетов при различных значениях нагрузки на валу АД

	Напряжений трехфазной сети, В			Ток трехфазной сети, А		
	U_{ad}	U_{bc}	U_{ca}	I_{ab}	I_{bc}	I_{ca}
$0,25 \cdot P_{2H}$	$220e^{j0}$	$220e^{j-120}$	$220e^{j120}$	$1,9 e^{j-63}$	$1,9 e^{j177}$	$1,9 e^{j57}$
$0,5 \cdot P_{2H}$				$2,2 e^{j-48}$	$2,2 e^{j-168}$	$2,2 e^{j72}$
$0,75 \cdot P_{2H}$				$2,7 e^{j-35}$	$2,7 e^{j-155}$	$2,7 e^{j85}$
P_{2H}				$3,6 e^{j-19}$	$3,6 e^{j-139}$	$3,6 e^{j101}$

Построим векторные диаграммы токов и напряжений (рисунок 3) для анализа сформированной системы напряжения.

Как можно видеть на рисунке 3, при заданных значениях механической нагрузки на валу к трехфазной обмотке статора будет приложена симметричная система напряжений, при этом действующее значение фазных напряжений на обмотке равно действующему значению напряжения однофазной сети.

На схеме (см. рисунок 1) и на векторных диаграммах (см. рисунок 3) обозначен вектор $U_{\text{шим}(1)}$, этот вектор соответствует первой гармонике переменного напряжения, которое формируется с использованием преобразователя однофазного напряжения в симметричное трехфазное [7].

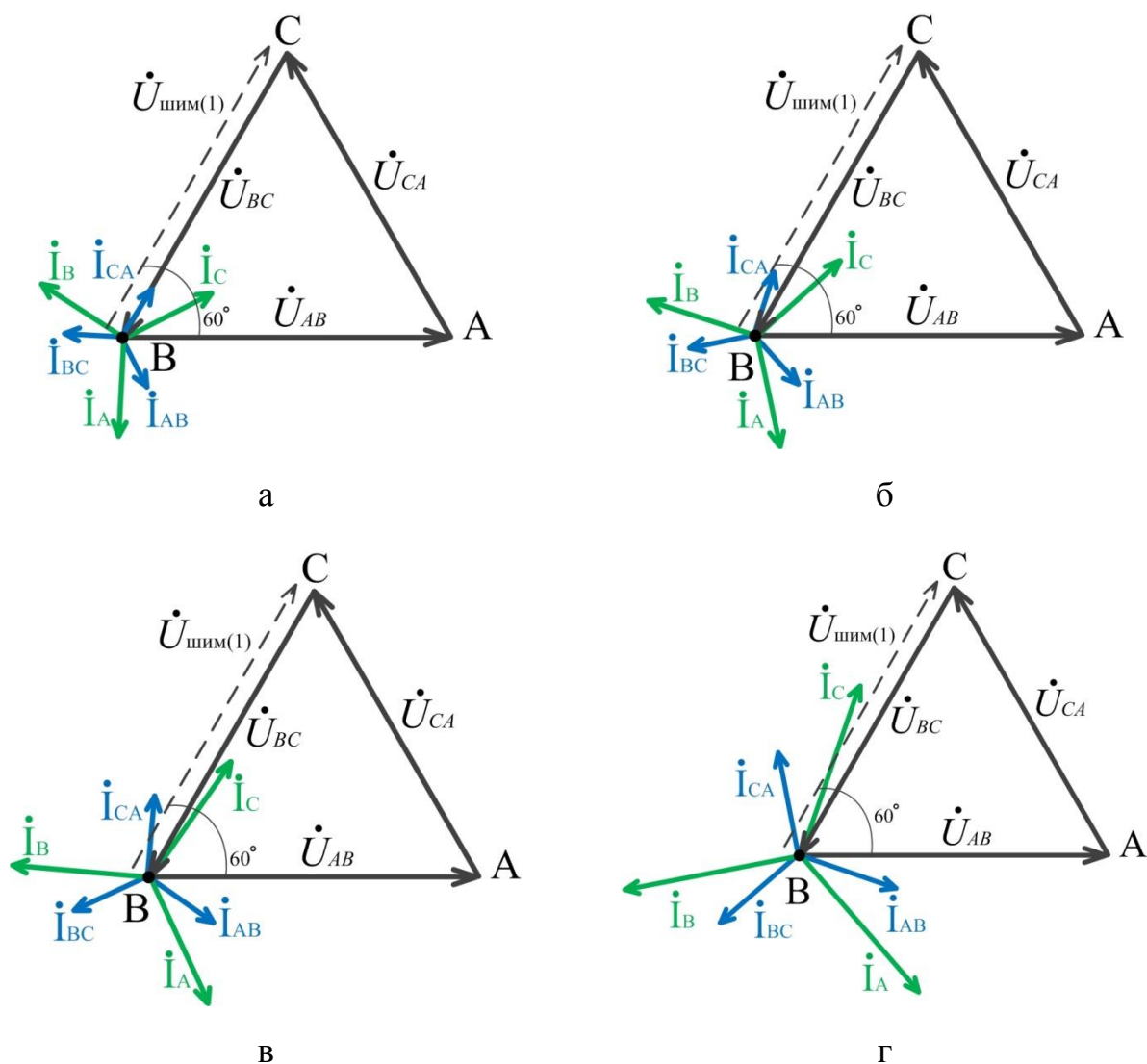


Рисунок 3 – Векторные диаграммы токов и напряжений на статорной обмотке асинхронного двигателя при нагрузке 25% (а), 50% (б), 75 % (в), 100 % (г)

Таким образом, два источника ЭДС с одинаковыми действующими значениями и имеющие смещение по фазе на 60 градусов один относительно другого позволяют создать на статорной обмотке асинхронного двигателя симметричную трехфазную систему напряжений.

Список литературы

1. Бухштабер, Е. Я. Вентильные преобразователи числа фаз / Е. Я. Бухштабер. – Москва : Энергия, 1980. – 183 с. – Текст: непосредственный.
2. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока // А. И. Вольдек, В. В. Попов. – Санкт-Петербург : Питер, 2010. – 352 с. – Текст: непосредственный.

3. Торопцев, Н. Д. Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 95 с. – Текст: непосредственный.

4. Харламов, В. В. Совершенствование схем подключения трехфазной обмотки асинхронного двигателя к однофазной сети / В. В. Харламов, А. Г. Галкин, Ю. В. Москалев, В. С. Лысенко. – Текст: непосредственный // Вестник Самарского государственного технического университета. – 2018. – № 4 (60). – С. 145-155.

5. Харламов, В. В. Повышение эффективности использования трехфазных асинхронных электродвигателей при питании от однофазной сети / В. В. Харламов, Ю. В. Москалев, В. С. Лысенко. – Текст: непосредственный // Омский научный вестник. – 2018. – № 3(159). – С. 27-31.

6. Kharlamov, V. V. Connection Three-Phase Winding of the Induction Motor to a Single-Phase Electrical Network : IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), November 2018 / V. V. Kharlamov, Y. V. Moskaev, V. S. Lysenko. – Text: direct // Dynamics. – 2018. – 8601428. – DOI: 10.1109.

7. Патент № 181495 РФ, МПК H01F 30/00. Преобразователь однофазного напряжения в симметричное трехфазное : № 2018113567 : заявлено 13.04.18 : опубликовано 17.07.18 / Харламов В. В., Москалев Ю. В., Лысенко В. С. – Заявитель и патентообладатель Омский государственный университет путей сообщения.

8. Кравчик, А. Э. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболевская. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 504 с. – Текст: непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Лысенко Виктор Сергеевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д.35, г. Омск, 644041,

Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электрические
машины и общая электротехника».

Тел.: +7(3812) 31-18-27.

E-mail: emoe.omgups.96@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Lysenko Victor Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., 35, Omsk, 644041,

the Russian Federation.

Post-graduate student of the Department of
Electrical Machines and General Electrical
Engineering.

Phone.: +7(3812) 31-18-27.

E-mail: emoe.omgups.96@yandex.ru

А. А. Ковалев¹, С. Н. Шелюг², Т. Т. Шаюхов¹

¹Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС),
г. Екатеринбург, Российская Федерация,

²Уральской федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(УрФУ), Екатеринбург, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ НЕЛИНЕЙНОЙ И НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

Задача расчета и минимизации потерь электроэнергии связана с необходимостью реализации программ повышения энергетической эффективности потребителей электроэнергии. В последние десятилетия широко применяется оборудование с тиристорными преобразователями, дуговые и индукционные печи, выпрямительные агрегаты и пр. Такого рода оборудование является примером нелинейной нагрузки. Применение энергоемких однофазных электроприемников приводит к возникновению несимметрии в электрических сетях.

Наличие в электрических сетях искажений, вызванных нелинейной и несимметричной нагрузкой, обуславливает необходимость пересмотра существующих подходов к расчету потерь мощности и электроэнергии.

Ключевые слова: потери, электроэнергия, несимметрия, несинусоидальность, нагрузка, интеллектуальный учет.

Alexey A. Kovalev¹, Stanislav N. Shelyug², Timur T. Shayukhov¹

¹Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, the Russian Federation,

²Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU),
Ekaterinburg, the Russian Federation

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CALCULATING ELECTRIC POWER LOSSES AT NONLINEAR AND NON-SYMMETRIC LOAD

The task of calculating and minimizing electricity losses is associated with the need to implement programs to improve the energy efficiency of electricity consumers. In recent decades, equipment with thyristor converters, arc and induction furnaces, rectifier units, etc. have been widely used. Such equipment is an example of a non-linear load. The use of energy-intensive single-phase electrical receivers leads to the emergence of asymmetry in electrical networks.

The presence of distortions in electrical networks caused by nonlinear and unbalanced loads necessitates a revision of existing approaches to calculating power and electricity losses.

Keywords: losses, electricity, asymmetry, non-sinusoidality, load, smart metering.

В течение последних 50 лет в сфере электроэнергетики, электронике, микропроцессорной технике происходили значительные изменения. Менялся подход к принципам исполнения электрооборудования, изменялся характер нагрузки. В последние годы все большее распространение получили электроприемники с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Такие электроприемники вызывают протекание несинусоидальных токов в электрических сетях. Кроме этого, в различных сферах промышленности и среди коммунально-бытовых потребителей широко распространены однофазные электроприемники. При их неравномерном распределении по фазам, возникает несимметрия в электрических сетях. Несинусоидальность и несимметрия являются причинами увеличения потерь электроэнергии в электрических сетях. Проблема наличия несинусоидальности и несимметрии характерна для электрических сетей нетяговых потребителей в силу особенностей их конструктивного исполнения. Существующие методы расчета потерь мощности и электроэнергии не позволяют получать точные результаты при наличии несинусоидальных и несимметричных нагрузок в сети.

Вопросы, касающиеся расчета потерь мощности и электроэнергии при наличии несимметрии и несинусоидальности в электрических сетях, рассматривались рядом исследователей, однако большинство из предлагаемых методик учитывают влияние лишь одного из указанных факторов: несимметрии или несинусоидальности.

В таблице 1 приведены последствия влияния несимметричной и несинусоидальной нагрузки на электрические сети и электрооборудование.

Актуальной задачей является разработка методики расчета потерь электроэнергии, учитывающей дополнительные потери от несимметрии и несинусоидальности.

Получившие в последние годы развитие приборы учета и измерительные системы контроля показателей качества электроэнергии позволяют получать значительный объем информации о процессах в электрических сетях и о состоянии электротехнического оборудования. Федеральный закон от

27.12.2018 N 522-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации» вводит понятие «Интеллектуальной системы учета электроэнергии (мощности)» [1].

Таблица 1

Влияние несимметрии и несинусоидальности напряжения на электрические сети и электрооборудование

Влияние несимметрии	Влияние несинусоидальности
1. Увеличение потерь электроэнергии в сетях за счет возникновения дополнительных потерь в нулевом проводе. 2. Возникновение магнитных полей в электродвигателях, вращающихся встречно вращению ротора. 3. Снижение срока службы электрических машин.	1. Интенсификация процессов старения и износа изоляции кабельных линий. 2. Рост суммарных потерь электроэнергии в электрических машинах, в том числе в трансформаторах. 3. Недоучет электроэнергии. 4. Ложные срабатывания устройств управления и защиты. 5. Выход из строя персональных компьютеров.

Интеллектуальная система учета электрической энергии (мощности) – совокупность функционально объединенных компонентов и устройств, предназначенная для удаленного сбора, обработки, передачи показаний приборов учета электрической энергии, обеспечивающая информационный обмен, хранение показаний приборов учета электрической энергии, удаленное управление ее компонентами, устройствами и приборами учета электрической энергии, не влияющее на результаты измерений, выполняемых приборами учета электрической энергии, а также предоставление информации о результатах измерений, данных о количестве и иных параметрах электрической энергии в соответствии с правилами предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности), утвержденными Правительством Российской Федерации.

Для ресурсоснабжающих организаций внедрение интеллектуального учета позволит сократить издержки за счет снижения потерь ресурсов, их более точного учета, снижения операционных затрат. Для реализации точного учета в

измерительных системах, требуется разработка алгоритма расчета потерь электроэнергии, с учетом влияющих на конечную величину потерь факторов.

Необходимо отметить, что точный расчет потерь электроэнергии важен для процесса планирования будущего электропотребления, который в свою очередь необходим для выхода потребителя на оптовый рынок электроэнергии и мощности.

Понимание структуры потерь электроэнергии является необходимым условием для выявления очагов наибольших потерь, их достоверного расчета и минимизации.

На рисунке 1 представлена обобщенная структура потерь электроэнергии.

$$\Delta W_{\text{факт}} = \Delta W_{\text{технол}} + \Delta W_{\text{ком}}$$

$$\Delta W_{\text{технол}} = \Delta W_{\text{технич}} + W_{\text{сн}} + \delta_{\text{пу}}$$

Рисунок 1 – Обобщенная структура потерь электроэнергии

Фактические потери включают в себя технологические и коммерческие потери. Технологические потери в свою очередь состоят из технических потерь, расхода энергии на собственные нужды подстанций и погрешностей приборов учета. Коммерческие потери – это хищения, несанкционированные подключения и т.п. Расчет технических потерь позволяет выявить очаги наибольших потерь и оказывать влияние на те процессы, которые вызывают повышенные потери.

В случае если в исследуемой сети отсутствуют приборы и средства, позволяющие получить необходимые для расчетов параметры, то используются данные контрольных замеров. Если же электрическая сеть обеспечена автоматизированными системами интеллектуального учета, приборами и средствами, позволяющими фиксировать значения показателей качества электроэнергии, то данные берутся из этих систем.

Данные, полученные в ходе контрольных замеров, обрабатываются с применением методов теории вероятности и статистики. Применение вероятностно-статистического подхода для расчета потерь электроэнергии описано в [2, 3]. С помощью данного подхода вычисляются параметры, необходимые для применения предлагаемой методики (значения напряжений, токов, их гармонический состав, мощности и пр.). Зачастую, объем данных о

параметрах сети, полученный из автоматизированных систем, достаточно большой. В этом случае, методы теории вероятности и статистики используются для укрупнения информации.

Применение методов математической статистики и теории вероятности позволяет получить эффективные аналитические модели графиков электрических нагрузок, модели изменения напряжений и токов в сети. Большинство методов расчета потерь электроэнергии базируются на использовании средних нагрузок (математических ожиданий нагрузок). Средние нагрузки в сравнении с нагрузками любого произвольного момента времени являются более точными и достоверными интегральными параметрами режимов, которые учитывают в компактном точечном виде многорежимность электрической сети на интервале времени T .

После обработки данных выполняется их анализ на предмет качества, достоверности и достаточности.

Вычисляется коэффициент формы графика нагрузки по известной формуле. Коэффициент формы графика характеризует неравномерность графика нагрузки и рассчитывается как отношение среднеквадратичной мощности электроприемника (группы электроприемников) за заданный интервал времени к среднему значению нагрузки за тот же период.

Оценка показателей качества электроэнергии по несимметрии и несинусоидальности производится в соответствии с ГОСТ 32144-2013 [4]. Определяется гармонический состав токов и напряжений. Определяются соответствующие коэффициенты.

Несимметричный и несинусоидальный характер нагрузки учтен в формуле для расчета потерь электроэнергии (1), выведенной экспериментальным путем:

$$\Delta W = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_l \cdot k_k \cdot T \cdot \sum_{n=1}^{40} (k_{In}^2 \cdot k_{\phi n}^2 \cdot k_{нссн}) \quad (1)$$

Методика предполагает определение коэффициентов, учитывающих несимметричный и несинусоидальный характер токов и напряжений в электрической сети:

$k_{\phi 2In}^2$ – коэффициента формы графика несимметрии тока на n -й гармонике по обратной последовательности;

$k_{\phi 0In}^2$ – коэффициента формы графика несимметрии тока на n -й гармонике по нулевой последовательности;

$k_{\text{фнсн}}^2$ – коэффициента формы графика несинусоидальности тока на n -й гармонике;

K_{HECn} – коэффициента увеличения потерь в линии с несимметричной нагрузкой на n -й гармонике;

k_{2ln} – модуля коэффициента несимметрии по обратной последовательности на n -й гармонике;

k_{0ln} – модуля коэффициента несимметрии по нулевой последовательности на n -й гармонике.

Указанные коэффициенты в разработанной методике объединены общим коэффициентом $k_{\text{нссн}}$, учитывающим влияние несимметрии и несинусоидальности на n -й гармонике.

Применяя предлагаемую методику, можно добиться точности расчетов с погрешностью 1–3%.

После проведения расчетов выполняется процедура выявления участков с наибольшими потерями, а далее разрабатываются и применяются мероприятия по минимизации потерь и повышению качества электроэнергии.

Типовые мероприятия, направленные на снижение потерь электроэнергии в электрических сетях достаточно хорошо известны и описаны в литературе [5]. В зависимости от потребителя, его категории надежности, особенностей функционирования перечень мероприятий может изменяться.

Применение предлагаемой методики позволит:

- повысить точность расчета потерь электроэнергии;
- выявлять элементы электрической сети с повышенными потерями электроэнергии;
- повысить точность прогнозирования будущего электропотребления;
- повысить надежность работы электротехнического оборудования.

Список литературы

1. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации : Федеральный закон от 27.12.2018 № 522-ФЗ : [принят Государственной думой 19 декабря 2018 года : одобрен Советом Федерации 21 декабря 2018 года]. – Москва : Кремль. – Текст : непосредственный.

2. Обоскалов, В. П. Применение вероятностно-статистических методов и теории графов в электроэнергетике : учебное пособие / В. П. Обоскалов, С. Е. Кокин, И. Л. Кирпикова. – Екатеринбург : УрФУ, 2016. – 271,[1] с. – Текст : непосредственный.

3. Ковалев, А. А. Вероятностно-статистический метод определения потерь электроэнергии в распределительных сетях нетяговых потребителей / А. А. Ковалев, С. Н. Шелюг, Т. Т. Шаюхов // Транспорт Урала. – 2019. – № 4 (63) – С. 69-74.

4. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения = Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст : введен впервые : дата введения 2014-07-01 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью «ЛИНВИТ» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». – Москва : Стандартинформ, 2014. – 20 с. – Текст : непосредственный.

5. Инструкция по снижению технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений. – Москва : СПО Союзтехэнерго, 1987.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ковалев Алексей Анатольевич

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).
Колмогорова, 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.
К.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» УрГУПС.
Тел.: +7 (343)221-25-27.
E-mail: akovalev@usurt.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kovalev Alexey Anatolyevich

Ural State University of Railway Transport(USURT).
66, Kolmogorova str., Ekaterinburg, 620034, the Russian Federation.
Ph.D., Associate Professor of the Department "Power supply of transport" USURT.
Phone: +7 (343)221-25-27.
E-mail: akovalev@usurt.ru.

Шелюг Станислав Николаевич
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина (УрФУ).
Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002,
Российская Федерация.
К.т.н., доцент кафедры
«Автоматизированные электрические
системы» УрФУ.
Тел.: +7 (343)221-25-27
E-mail: sshelyug@mail.ru.

Shelyug Stanislav Nikolaevich
Ural Federal University named after the first
President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).
19, Mira str., Ekaterinburg, 620002,
the Russian Federation.
Ph.D., Associate Professor of the Department
"Automated electrical systems" UrFU.
Phone: +7 (343) 221-25-27.
E-mail: sshelyug@mail.ru.

Шаюхов Тимур Талгатович
Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС).
Колмогорова, 66, г. Екатеринбург,
620034, Российская Федерация.
Старший преподаватель кафедры
«Электроснабжение транспорта» УрГУПС.
Тел.: +7 (343)221-25-27.
E-mail: tshayuhov@usurt.ru.

Shayukhov Timur Talgatovich
Ural State University of Railway
Transport(USURT).
66, Kolmogorova str., Ekaterinburg, 620034,
the Russian Federation.
Senior Lecturer of the Department of "Power
Supply of Transport" USURT.
Phone: +7 (343) 221-25-27.
E-mail: tshayuhov@usurt.ru.

УДК 004.7:621.317

А. Г. Малютин, В. С. Циркин

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

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПОТ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Проявлением цифровой трансформации в электроэнергетике является полная интеграция интеллектуальных коммуникационных технологий между генераторами, сетями и потребителями, что обеспечивается применением технологий промышленного Интернета вещей (IIoT). В работе рассмотрены преимущества внедрения решений Интернета вещей в электроэнергетике, и пример применения IIoT в системе мониторинга объектов энергоснабжения.

Ключевые слова: промышленный интернет вещей, автоматизированная система, мониторинг, система электроснабжения, цифровая железная дорога.

APPLYING OF IIOT TECHNOLOGIES IN POWER SUPPLY MONITORING SYSTEMS

A manifestation of digital transformation in the electric power industry is the full integration of intelligent communication technologies between generators, networks and consumers, which is ensured by the use of Industrial Internet of Things (IIoT) technologies. The article considers the advantages of implementing IIoT solutions in the electric power industry, and an example of using IIoT in the power supply monitoring systems.

Keywords: industrial internet of things, automated system, monitoring, power supply system, digital railway.

Реализация проекта «Цифровая железная дорога» и положений национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации», предполагает трансформацию существующих и создание новых отраслевых систем посредством применения сквозных цифровых технологий, а также перспективных решений в области электроэнергетики [1, 2].

В рамках Национальной технологической инициативы действует долгосрочная программа развития *EnergyNet* – экосистема производителей и потребителей энергии, благодаря которой все участники энергорынка интегрируются в общую инфраструктуру и обмениваются энергией.

Архитектура *EnergyNet* обеспечивает развитие трех основных позиций:

- надежные и гибкие сети;
- распределенная энергетика;
- потребительские сервисы.

В рамках концепции *EnergyNet* и перечня приоритетных направлений и задач ОАО «РЖД» в энергетике и ресурсосбережении важным является развитие адаптированных под задачи инфокоммуникационных технологий, внедрение интеллектуальных систем мониторинга объектов инфраструктуры энергоснабжения, позволяющих обеспечить снижение уровня небаланса и потерь электроэнергии в тяговой сети и снижения потребления электроэнергии.

Один из путей решения этих задач – развитие мобильных диагностических комплексов на базе архитектуры *EnergyNet* и технологий

индустриального (промышленного) интернета вещей (*Industrial Internet of Things, IIoT*), обеспечивающих мониторинг, оценку и прогнозирование состояния объектов инфраструктуры энергоснабжения.

Применительно к рассматриваемой задаче *IIoT* раскрывается как среда передачи и сбора данных, мобильных диагностических комплексов со встроенными датчиками и программным обеспечением для сбора и обмена информацией о состоянии объекта энергоснабжения, с возможностью удаленного контроля и управления объектом в автоматизированном режиме.

Перспективы и области применения промышленного Интернета вещей на российских железных дорогах и зарубежный опыт внедрения Интернета вещей на железнодорожном транспорте рассмотрен в ряде работ российских и зарубежных авторов [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Российские производители оборудования и программного обеспечения для предприятий ТЭК (топливно-энергетический комплекс) активно разрабатывают инновационные продукты для применения во всех сегментах энергетики, таких как генерация, передача и распределение, сбыт и потребление (рисунок 1).

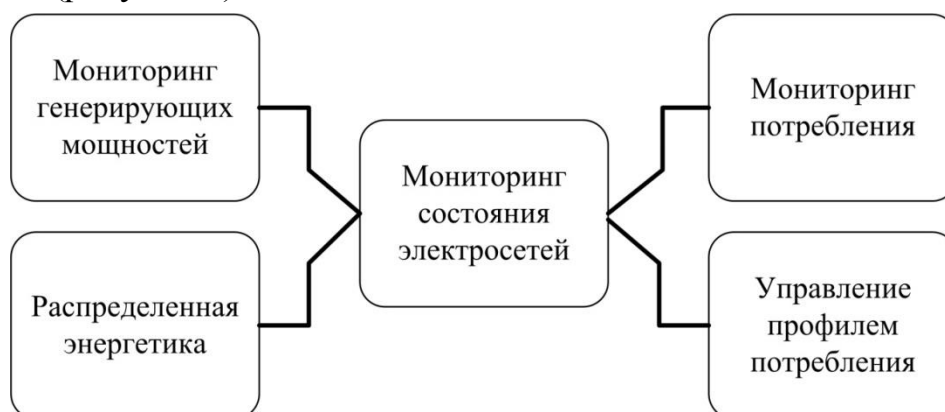


Рисунок 1 – Интернет вещей в электроэнергетике

Технологическая архитектура *IIoT* представлена на рисунке 2. В настоящее время около 60% промышленных предприятий в России используют или тестируют *IIoT*-технологии. Ожидается, что в ближайшие 2 – 3 года оборот рынка интернета вещей в России увеличится в три раза, чему будет способствовать массовый запуск сетей мобильной связи 5G, адаптированных под *IIoT*. Архитектура Интернета вещей на уровне среды сбора данных предполагает применение беспроводных технологий дальнего радиуса действия

с низким уровнем энергопотребления (*LPWAN*, *Low-power Wide-area Network*). В настоящее время получили распространение несколько *LPWAN*-продуктов: *Sigfox*, *LoRa*, *Weightless-P*, *Ingenu*, «СТРИЖ Телематика», *NB-IoT* и др.

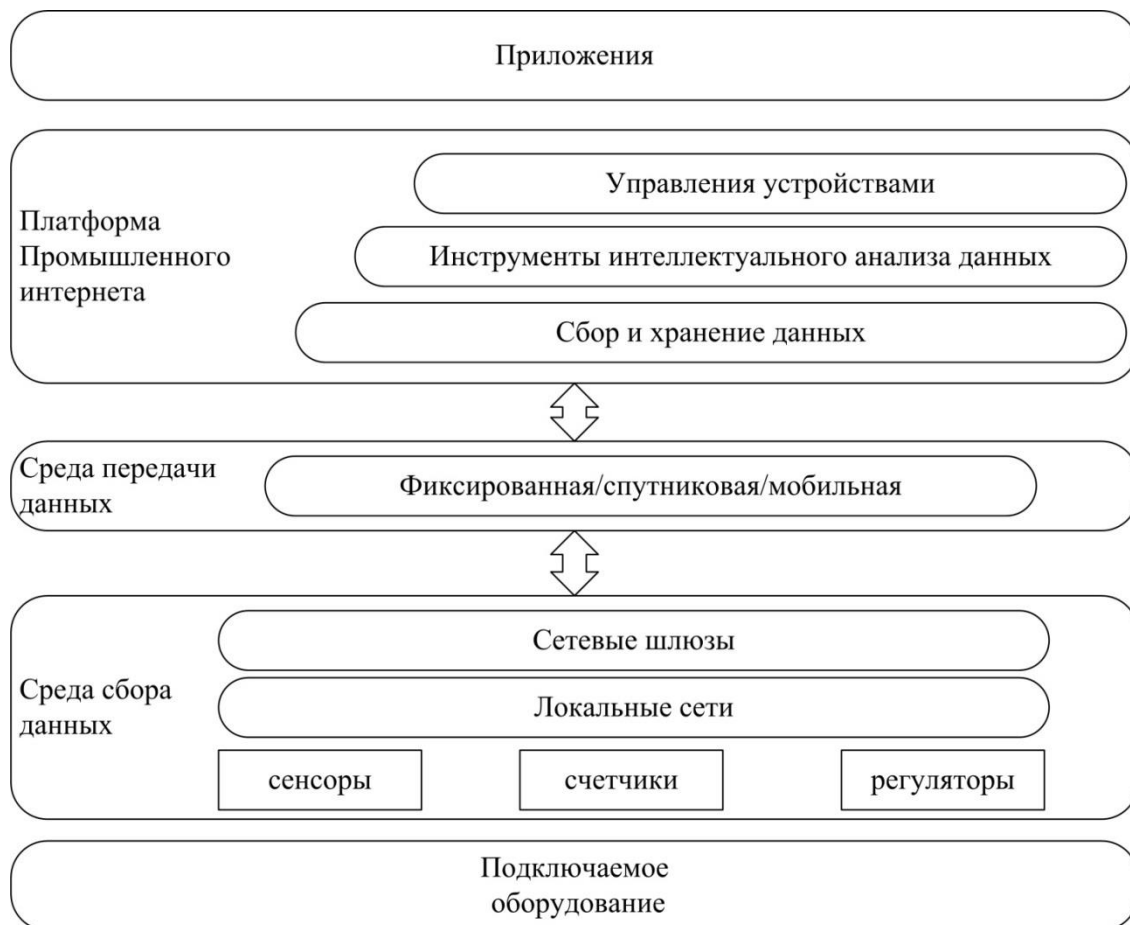


Рисунок 2 – Технологическая архитектура PoT

В качестве примера применения *LPWAN*-технологий и протоколов PoT рассмотрим стек протоколов (рисунок 3) автоматизированной системы мониторинга и учета энергоресурсов (АСМУЭ) [6], где:

- уровень мобильных информационно-измерительных комплексов (ИИК);
- уровень локальных информационно-вычислительных комплексов (ЛИВК);
- информационно-вычислительный комплекс (ИВК);
- внешние пользователи и сервисы (ВПС).

Рабочий прототип системы реализован на опытном полигоне Свердловской железной дороги [6]. Система ориентирована на применение *LPWAN* технологий, таких как *LoRa* и *XNB* [7].

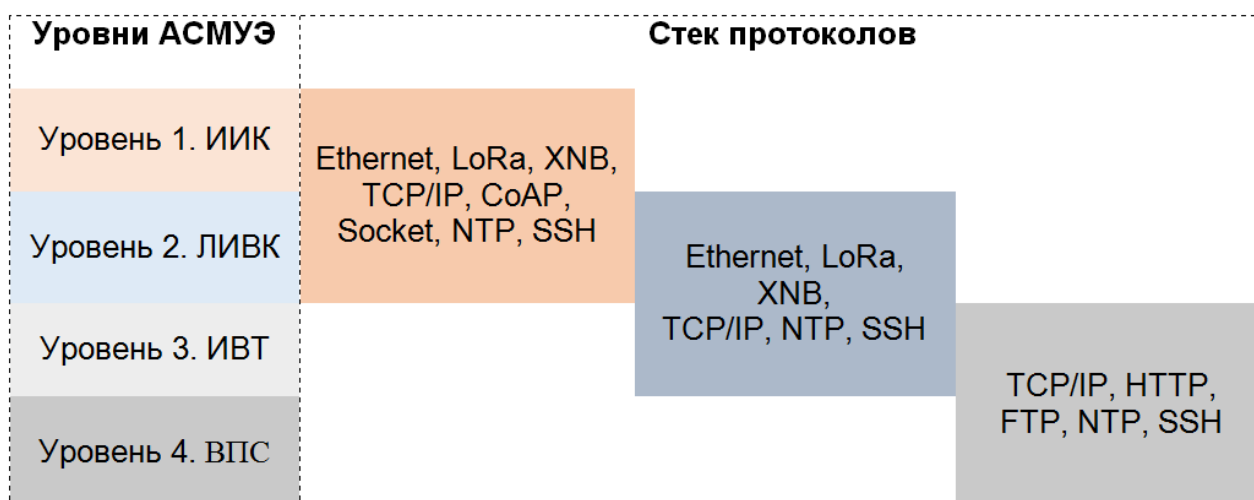


Рисунок 3 – Стек протоколов АСМУЭ

К преимуществам *LPWAN*-технологий можно отнести возможность интеграции практически неограниченного количества ИИК, высокую проникающую способность сигнала и высокую энергетическую эффективность (таблица 1).

Таблица 1

Характеристики технологий передачи данных

Характеристики	Технологии передачи данных			
	LPWAN: LoRa, XNB («СТРИЖ»)	WPAN: ZigBee (6LoWPAN)	WLAN: WiFi	WWAN: GSM/UMTS/ LTE
Энергетическая эффективность	высокая	средняя	низкая	средняя
Скорость передачи данных (DTR)	низкая	средняя	высокая	высокая
Расстояние, м	> 3000	50 – 100	50	500 – 1000

Учитывая недостатки *LPWAN*-технологий (низкая скорость передачи данных, высокая задержка сигнала, низкая пропускная способность сети), целесообразно обеспечить учет этих ограничений в протоколах верхнего уровня системы [6]. В частности необходимо минимизировать долю служебного трафика, повысить эффективность передачи как измеряемых параметров с локализацией по времени и месту, так и динамических

характеристик – временных характеристик и спектров сигналов с высокой точностью и степенью дискретизация (с частотой до 16000 Гц). Все это обеспечивается за счет высокоуровневого адаптированного протокола передачи данных с поддержкой сервисных функций (выполнение команд оператора системы, диагностирование элементов системы, обновление программного обеспечения ИИК и другие).

Мобильные информационно-измерительные комплексы подключаются к подсистеме ЛИВК с использованием технологий *LPWAN* и локальных сетей, ориентированных на промышленную эксплуатацию (*Ethernet*, *LoRa*, *XNB* и др.), и беспроводных технологий глобальных сетей операторов связи (например, *UMTS*, *LTE* и др.) [7].

Основу транспортной архитектуры большинства уровней составляет стек *TCP/IP*, на прикладном уровне стека используются протоколы *CoAP* и *HTTP* и собственный адаптированный протокол передачи данных. Для обмена информацией между ИВК и внешними пользователями и сервисами могут быть задействованы корпоративные и глобальные сети (Интернет, с поддержкой технологии *VPN*), которые могут взаимно резервировать друг друга [6].

В работе рассмотрены технические решения на основе технологии *IoT* применительно к задаче мониторинга объектов энергоснабжения на примере АСМУЭ опытного полигона Свердловской железной дороги. Использование технологии *IoT* позволило повысить уровень масштабирования, связности сети, степень интеграции с существующими и перспективными решениями.

Список литературы

1. Тамаркин, В. М. Промышленный интернет вещей на железнодорожном транспорте / В. М. Тамаркин, Т. Э. Лобанова, М. В. Тамаркин. – Текст: непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2018. – № 8. – С. 10-13.
2. Тамаркин, В. М. Технологии промышленного интернета вещей в рамках идеологии цифровой железной дороги / Тамаркин В. М., Лобанова Т. Э. – Текст: непосредственный // Наука и технологии железных дорог. – 2019 – № 2 (2). – С. 76-84.
3. Perry Lea. Internet of Things for Architects: Architecting IoT solutions by implementing sensors, communication infrastructure, edge computing, analytics, and security / Lea Perry. – Packt Publishing Ltd, 2018. – Text: direct.

4. Manavalan, E. A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements / E. Manavalan, K. Jayakrishna. – Text: direct // Computers & Industrial Engineering. – 2019. – №127. – PP. 925-953.

5. Ray, P. P. A survey on Internet of Things architectures / P. P. Ray. – Text: direct // Computer and Information Sciences. – 2018. – №30. – PP. 291-319.

6. Malyutin, A. G. Architecture of the automated information system for monitoring and resources accounting / A. G. Malyutin, A. A. Lavrukhin, A. S. Okishev // Mechanical Science and Technology Update (MSTU-2018). – Journal of Physics: Conf. Series 1050, 2018.

7. Селезнёв, С. П. Архитектура промышленных приложений IoT и протоколы AMQP, MQTT, JMS, REST, CoAP, XMPP, DDS / С. П. Селезнёв, В. В. Яковлев. – Текст: непосредственный // International Journal of Open Information Technologies. – 2019 – vol.7, no.5. – ISSN: 2307-8162.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Малютин Андрей Геннадьевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д.35, г. Омск, 644041,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Автоматика и
системы управления» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: malyutinag@inbox.ru

Циркин Виталий Степанович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д.35, г. Омск, 644041,

Российская Федерация.

ст. преподаватель кафедры «Автоматика и
системы управления» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 38-29-33.

E-mail: tsirkinvs@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Malyutin Andrey Gennadievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., 35, Omsk, 644041,

the Russian Federation.

Ph.D. in Technical Sciences, head of the
department «Automatic and control
systems» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: malyutinag@inbox.ru

Tsirkin Vitaly Stepanovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., 35, Omsk, 644041,

the Russian Federation.

Senior Lecturer of the Department «Automatic
and control systems» OSTU.

Phone: +7 (3812) 38-29-33.

E-mail: tsirkinvs@gmail.com.

«РАЗРАБОТКА СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ТЯГИ ПОЕЗДОВ НА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ И НЕЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ»

УДК 621.331.3.025.1

С. И. Макашева, А. Р. Мамаев

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
г. Хабаровск, Российская Федерация

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В работе проводится анализ современного локомотивного парка, используемого на Дальневосточной железной дороге, и объемов электрической энергии, реализуемых ими на рекуперативное торможение. На основании статистических данных по расходу электроэнергии на тягу поездов и рекуперацию производится оценка реальных и потенциальных диапазонов применения рекуперации на Дальневосточной железной дороге.

Ключевые слова: рекуперативное торможение, интенсивность применения рекуперативного торможения, расход электрической энергии.

Svetlana I. Makasheva, Alexandr R. Mamaev

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

ON THE ISSUE OF IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC ENERGY RECOVERY IN THE AC TRACTION NETWORK

The paper deals with analyzes the modern locomotive types used at the Far Eastern railway, and the amount of electric energy that they save due to regenerative braking. Based on statistical data on electricity consumption for traction and recuperation, the real and potential ranges of recuperation applications are estimated.

Keywords: regenerative brake, regenerative brake intensity, power consumption.

Сегодня в направлении портов Дальнего Востока России перевозится грузов больше, чем в лучшие времена советского периода, поэтому инвестиционная программа ОАО “РЖД” ориентирована на усиление инфраструктуры и энергетики восточного направления железной дороги наряду с интенсивным увеличением объемов грузооборота [1]. В условиях повышения интенсивности движения по электрифицированным участкам железной дороги переменного тока значительно возрастают веса и длины поездов, поэтому величины тяговых токов, потребляемых электроподвижным составом, также значительно возрастают по сравнению с поездами средних веса и длины [1, 2]. На тягу поездов расходуется 75% всех потребляемых топливно-энергетических ресурсов ОАО “РЖД”, поэтому согласно “Энергетической стратегии железнодорожного транспорта на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года” для железнодорожного транспорта к наиболее действенным мероприятиям в области ресурсосберегающих и энергоэффективных технологий относится применение рекуперативного торможения (РТ), что позволяет осуществлять экономию значительного объема электрической энергии в системе тягового электроснабжения [1, 3].

Для оценки перспектив использования РТ и повышения его эффективности произведем анализ состава локомотивного парка Дальневосточной железной дороги (ДВЖД). На рисунке 1 представлено долевое распределение количества грузов, перевозимых четырьмя основными типами электроподвижного состава (ЭПС), которые находятся в распоряжении ДВЖД в настоящее время.

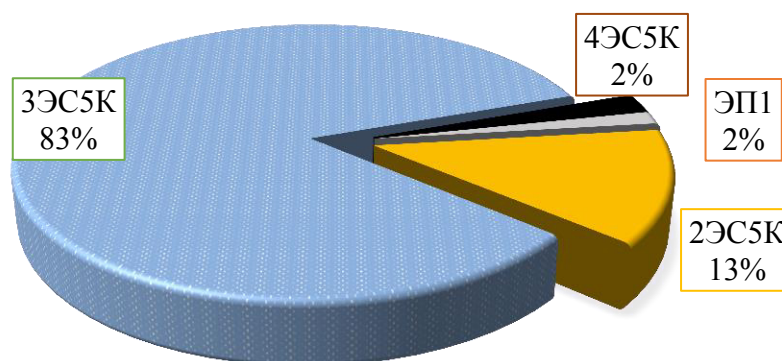


Рисунок 1 – Распределение грузов, перевозимых по ДВЖД, по сериям ЭПС

Как следует из рисунка 1, наибольшее количество грузов (83%) перевозится ЭПС серии 3ЭС5К, а на долю остальных серий ЭПС приходится

17% грузоперевозок. Далее были проанализированы статистические данные по количеству электрической энергии, зафиксированной счетчиками ЭПС, полученной за счет РТ за 2018-2019гг по ДВЖД. Долевое распределение энергии РТ по типам ЭПС представлено на рисунке 2.

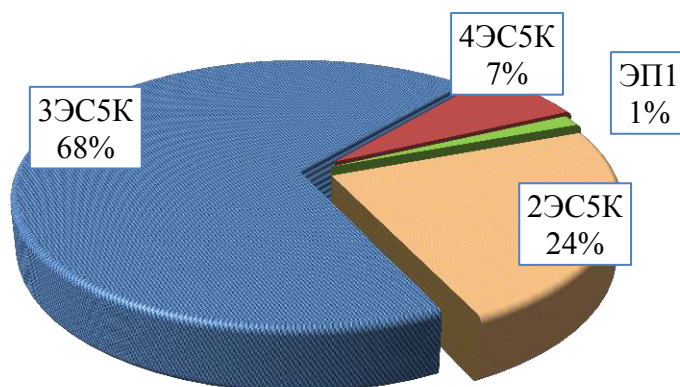


Рисунок 2 – Распределение энергии РТ по типам ЭПС

Как следует из рисунка 2, подавляющая часть энергии реуперации (68%) реализуется ЭПС серии 3ЭС5К, что закономерно, учитывая доминирующую позицию этой серии локомотивов в долевом распределении количества перевозимых грузов по ДВЖД. Практически четверть энергии РТ реализуется электровозом серии 2ЭС5К, т.о., на два типа этих ЭПС приходится 92% всей энергии рекуперации на ДВЖД.

Значительную роль в эффективности применения РТ на железнодорожном транспорте, помимо объема перевозок, затраченной электроэнергии и состава локомотивного парка, играет наличие продольного профиля пути с достаточными уклонами. Наличие спусков (и, соответственно, подъёмов в обратном направлении движения состава) создаёт потенциал для применений РТ, который необходимо оценить и выяснить, все ли возможности РТ в полной мере использованы на действующих участках. Дорожный топливно–энергетический центр ДВЖД ведет статистику абсолютных и удельных объёмов энергии РТ, которая подсчитывается по каждому эксплуатационному локомотивному депо (ТЧЭ), в рамках анализа использования топливно–энергетических ресурсов на тягу поездов.

В таблице 1 приведены абсолютные и удельные показатели возврата энергии РТ за 2018–2019гг.

Для оценки степени использования РТ используется коэффициент интенсивности применения РТ – K_p [4,5]

$$K_p = \frac{W_{\text{тяги}}}{W_{\text{РТ}}} \cdot 100, \% \quad (1)$$

где $W_{\text{тяги}}$ – расход электроэнергии на тягу поездов, кВт·ч;

$W_{\text{РТ}}$ – электроэнергия, полученная за счёт рекуперации, кВт·ч.

Таблица 1

Расход электроэнергии по ДВЖД

Подразделение	На тягу поездов, тыс. кВт·ч		Рекуперация			
			абсолютная, тыс. кВт·ч		удельная, кВт·ч/10 тыс.т–км брутто	
	2018г.	2019г.	2018г.	2019г.	2018г.	2019г.
ТЧЭ–1	449978	461969	47214,7	49622,3	8,69	8,82
ТЧЭ–2	648032	687413	56353,2	63709,2	7,43	8,1
ТЧЭ–4	454921	461229	39634,9	40853,3	7,5	7,75
ТЧЭ–6	211856	212873	19609,2	18084,6	8,53	7,86
ТЧЭ–8	409413	419272	89113,3	88775,5	25,97	26,06
ТЧЭ–14	5189,8	5061	316,8	468,1	8,19	11,21
Итого по ДВЖД	2179652	2249766	252269,6	261918,4	10,48	10,68

Рассчитаем коэффициент интенсивности применения РТ по данным таблицы 1 и представим результаты в виде рисунка 3, где левый столбец по каждому ТЧЭ соответствует 2018 , а правый – 2019 году.

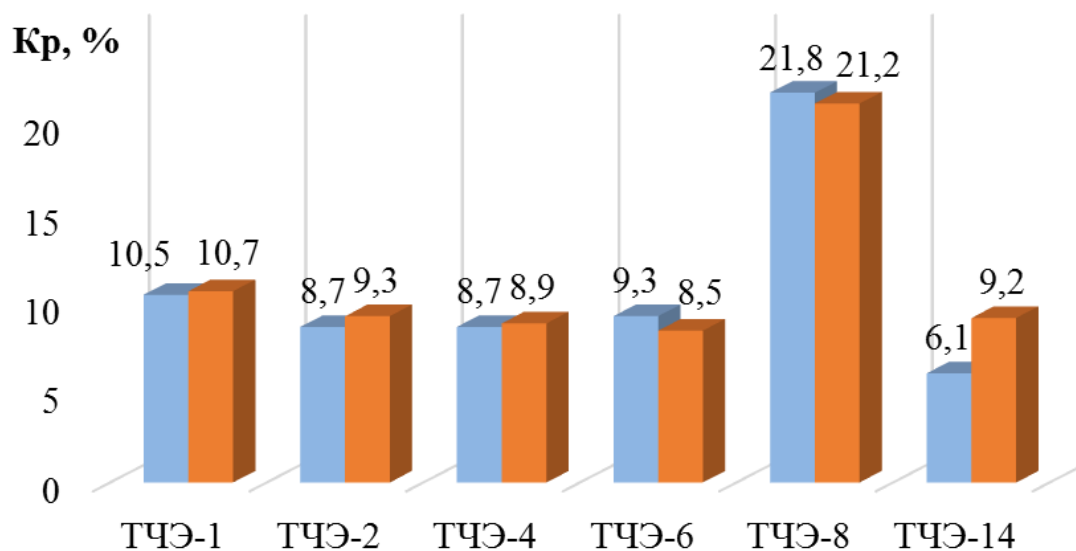


Рисунок 3 – Интенсивность применения РТ на ДВЖД

Как следует из рисунка 3, на сегодняшний день применение РТ на переменном токе на большинстве электрифицированных участков ДВЖД проводится весьма интенсивно ($K_p > 8,5\%$), неизменным “лидером” по интенсивности применения РТ остается Владивостокский участок от Смоляниново до Находки, где расположено ТЧЭ-8 и имеются самые большие по величине и протяженности уклоны продольного профиля пути (до $28 ‰$) [4]. Вместе с тем, на участках, где уклоны продольного профиля пути имеются, необходимо оценить потенциальные возможности применения РТ, причем это можно сделать на стадии проектных расчетов с применением сертифицированных средств вычисления. Используя комплекс расчетов системы тягового электроснабжения (КОРТЭС), произведем серию тяговых расчетов с поездами различных масс при движении их по участку Архара – Облучье ДВЖД, где расположен ТЧЭ – 1. Этот участок был выбран в качестве самого перспективного для развития РТ для дальнейшего анализа в качестве объекта исследования.

Моделируя движение состава определенного веса от 6400 тонн до 11900т включительно в четном направлении с выбранным типом ЭПС рассмотрим, как изменятся выходные характеристики тяговых расчетов. Пошагово изменяя вес поезда и не изменяя серию ЭПС, ведущего этот состав, была проведена серия из 12 расчетов для участка Архара – Облучье ДВЖД. В результате каждого проведенного расчета фиксировались следующие характеристики:

- количество электроэнергии, затраченной на поездку на тягу, W_p , тыс. кВт·ч.
- количество рекуперированной энергии за поездку, $W_{прт}$, тыс. кВт·ч.
- коэффициент использования РТ, K_p , %.

Результаты произведенных расчетов представлены на рисунке 4, где помимо коэффициента интенсивности применения РТ изображена прямая линейной аппроксимации.

Анализируя данные рисунка 4, можно заключить, что при увеличении массы состава интенсивность применения РТ возрастает практически линейно. На каждые 500 тонн увеличения веса состава K_p в среднем увеличивается на 0,2%.

В целом, при увеличении массы тяжеловесного состава практически в 2 раза с 6900 до 11400 тонн, расчетное значение K_p увеличивается незначительно – с 21,4% до 23,4%, т.е. всего на 2%.

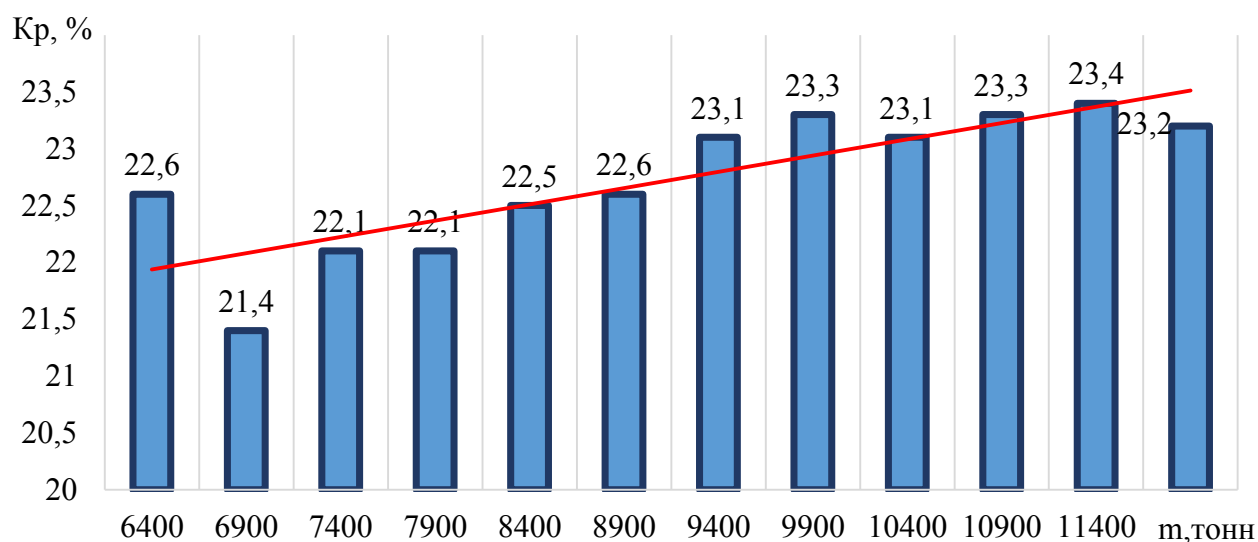


Рисунок 4 – Результаты расчёта интенсивности применения РТ по участку
Архара-Облучье ДВЖД

Сравнивая статистические эксплуатационные (полученные из отчетов ДВЖД) и аналитические (рассчитанные при помощи КОРТЭС) значения K_p на участке Архара – Облучье ДВЖД (ТЧЭ-1), можно заключить, что аналитические значения почти вдвое превышают эксплуатационные: ($K_{p \text{ расч}} \approx 20 \%$) $\gg$ ($K_{p \text{ экпл}} \approx 10 \%$). Такое расхождение объясняется тем, что помимо аналитических зависимостей, нашедших применение при расчете расходов электрической энергии, на практике более важным становится обеспечение надежной работы ЭПС при рекуперации, что связано как с работой устройств самого электровоза, как и с работой элементов системы тягового электроснабжения – компенсирующих устройств, подпитывающих подстанций и т.д. Как показывает анализ отказов электрооборудования ЭПС, основная часть случаев выходов из строя силовой части выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) происходит из-за повреждения электронных элементов и сбоев в системе управления. Причем, значительная часть таких отказов приводит к пропуску импульсов управления на тиристорные плечи ВИП, что вызывает срабатывание устройств защиты ЭПС и срывы рекуперативного торможения [2]. Поэтому наличие значительных уклонов продольного профиля пути и устойчивой тенденции на увеличение массы тяжеловесных составов далеко не всегда становится гарантией увеличения интенсивности применения РТ. В настоящее время для участков ДВЖД сдерживающими факторами для развития

РТ являются: ограничение уровня напряжения в тяговой сети, требования по обеспечению надлежащего качества электрической энергии на тяговых подстанциях, особенности конструкции, параметров и мест установки компенсирующих устройств в тяговой сети, наличие значительной перегрузка трансформаторов тяговых подстанций и т.д. [1,2]. Указанные особенности требуют проведения дополнительных исследований с целью оптимизации параметров и условий совместного функционирования упомянутых устройств при применении рекуперативного торможения с целью повышения энергоэффективности перевозочного процесса.

Список литературы

1. Пинчуков, П. С. Устройства релейной защиты в условиях тяжеловесного движения / П. С. Пинчуков, С. И. Макашёва – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 8. – С. 40-42.
2. Обзор перспектив повышения энергетической эффективности и надёжности рекуперативного торможения на электроподвижном составе / И. А. Баринов, Д. А. Яговкин, В. С. Иванов [и др.]. – Текст : непосредственный // Электропривод на транспорте и в промышленности : сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции. – 2018. – С. 150-156.
3. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 г. и на перспективу до 2030 г. : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2537р от 14 декабря 2016] – Текст : электронный // Техэксперт : сайт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111037> (дата обращения: 28.11.2020).
4. Макашева, С. И. Энергосбережение и качество электрической энергии при применении рекуперативного торможения на ДВжд / С. И. Макашева. – Текст : непосредственный // Наука - Хабаровскому краю : материалы IV краевого конкурса работ молодых ученых и аспирантов. – Владивосток, Хабаровск: ДВО РАН. – 2002. – С. 55-66.
5. Балабанов, В. Н. Влияние рекуперативного торможения на эффективность работы системы тягового электроснабжения переменного тока : учебное пособие / В. Н. Балабанов. – Хабаровск : ХаБииЖТ, 1991.– 82с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Макашева Светлана Игоревна

Дальневосточный государственный
университет путей сообщения (ДВГУПС).
Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021,
Российская Федерация.
Доцент кафедры «Системы
электрообеспечения» ДВГУПС.
Тел.: +7 (4212) 40-75-59.
E-mail: smakasheva@gmail.com

Мамаев Александр Романович

Дальневосточный государственный
университет путей сообщения (ДВГУПС).
Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021,
Российская Федерация.
Студент 651 гр. Электроэнергетического
института ДВГУПС.
Тел.: +7 (4212) 40-70-60.
E-mail: iernoeen@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Makasheva Svetlana Igorevna

Far Eastern State Transport
University (FESTU).
47, Seryshev st., Khabarovsk, 680021,
the Russian Federation.
Associative professor of the department
"Power supply systems" FESTU.
Phone: +7 (4212) 40-75-59.
E-mail: smakasheva@gmail.com

Mamaev Alexandr Romanovich

Far Eastern State Transport University
(FESTU).
47, Seryshev st., Khabarovsk, 680021,
the Russian Federation.
Student of 651 group of the Power Energy
Institute of FESTU.
Phone: +7 (4212) 40-70-60.
E-mail: iernoeen@gmail.com.

УДК 629.41

В. А. Мельников

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

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ МСУ-ТП ТЕПЛОВОЗОВ 2ТЭ116У С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММ НА VBA

Бортовые микропроцессорные системы управления современных локомотивов позволяют получать и накапливать информацию о режимах работы их оборудования за значительные промежутки времени. Однако, обработка подобных объёмов информации требует применения средств автоматизации, которые, зачастую требуют финансовых вложений специальных навыков. В статье рассмотрены методы и результаты автоматизированной обработки информации бортовой микропроцессорной системы МСУ-ТП тепловозов 2ТЭ116У посредством функций Visual Basic for Applications, доступных каждому пользователю Microsoft Excel.

Ключевые слова: Статистический анализ, бортовые микропроцессорные системы, эксплуатация, диагностика дизельных ДВС, диагностика тяговых электродвигателей, корреляционный анализ.

Viktor A. Melnikov

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

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ МСУ-ТП ТЕПЛОВОЗОВ 2ТЭ116У С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММ НА VBA

On-board microprocessor control systems of modern locomotives allow obtaining and accumulating information about the operating modes of their equipment for significant periods of time. However, the processing of such volumes of information requires the use of automation tools, which often require financial investments of special skills. The article discusses the methods and results of automated information processing of the on-board microprocessor system MSU-TP of diesel locomotives 2TE116U using the Visual Basic for Applications functions available to every user of Microsoft Excel.

Keywords: Statistical analysis, on-board microprocessor systems, operation, diagnostics of diesel internal combustion engines, diagnostics of traction motors, correlation analysis.

Совершенствование конструкции систем управления отечественных локомотивов в части автоматизации процесса управления и замены реле и механических регуляторов на электронные компоненты привело к возникновению в начале 2000х годов микропроцессорных систем управления (далее – МСУ), наиболее широко распространёнными семействами которых являются МСУД и МПСУ электровозов, а также МСУ-Т и МПСУ-Т тепловозов. Несмотря на различия в отдельных конструктивных решениях и компонентной базе, общая структура идентична для всех МСУ и включает в себя датчики, входные преобразователи сигнала (АЦП и счётчики), управляющую стойку, выходные преобразователи и блок индикации с запоминающим устройством.

Наличие запоминающего устройства позволяет сохранять информацию о значениях параметров входных и выходных сигналов МСУ для её дальнейшей передачи через съёмный USB-накопитель или беспроводной канал (GPRS или

Wi-Fi). Именно эта особенность МСУ делает её привлекательной с точки зрения исследования режимов работы локомотива.

Применительно к данным тепловозов 2ТЭ116У попытки использования данных МСУ для анализа режимов работы тепловозов и его диагностики неоднократно предпринимались специалистами ПГУПС [1], РУТ (МИИТ), ООО «ЛокоТех» [2-3] и ООО «Кlover групп» [4] однако каждый раз выполнялся или статистический анализ отдельных участков данных, или поиск отдельных инцидентов на основании чётко обозначенных допусков.

В рамках выполненного автором статьи исследования, данные 126 секций тепловозов 2ТЭ116У, содержащие суммарно более 3000 суток эксплуатации были экспортированы в таблицы Microsoft Excel и проанализированы с использованием специально написанного на встроенном языке программирования Visual Basic for Applications макроса использующего разработанные РУТ (МИИТ) статистические методы [5]. Основной целью выполненного анализа была проверка данных на соответствие нормальному закону распределения с целью определения их достоверности. Вторичной целью было выявление специфических зависимостей, которые в можно было бы использовать при дальнейших исследованиях.

Анализ распределения времени работы тепловозов по позициям контроллера машиниста (далее – ПКМ) приведённый на рисунке 1 показал, что по всем локомотивам наибольшее время работы приходится на нечётные позиции контроллера, причём наибольшее время работы приходится на ПКМ 1 и 11. При этом, для Свердловской железной дороги наибольшее время работы приходится на ПКМ 11, а на Приволжской и Октябрьской железных дорогах – на ПКМ 1.

Анализ соответствия распределения времени работы на позиции контроллера нормальному закону приведённый на рисунке 2 показал, что наибольшая вероятность соответствия (и, как следствие – достоверность данных) по всем тепловозам наблюдается для ПКМ3 (вероятность соответствия 0,9903, рисунок 2б), в то время как для ПКМ11 высокая вероятность соответствия была достигнута только на Приволжской железной дороге и составила 0,86 (рисунок 2в), а для ПКМ 1 – только на Октябрьской (вероятность соответствия 0,58, рисунок 2а). Таким образом, для каждой железной дороги есть свои характерные режимы эксплуатации тепловозов.

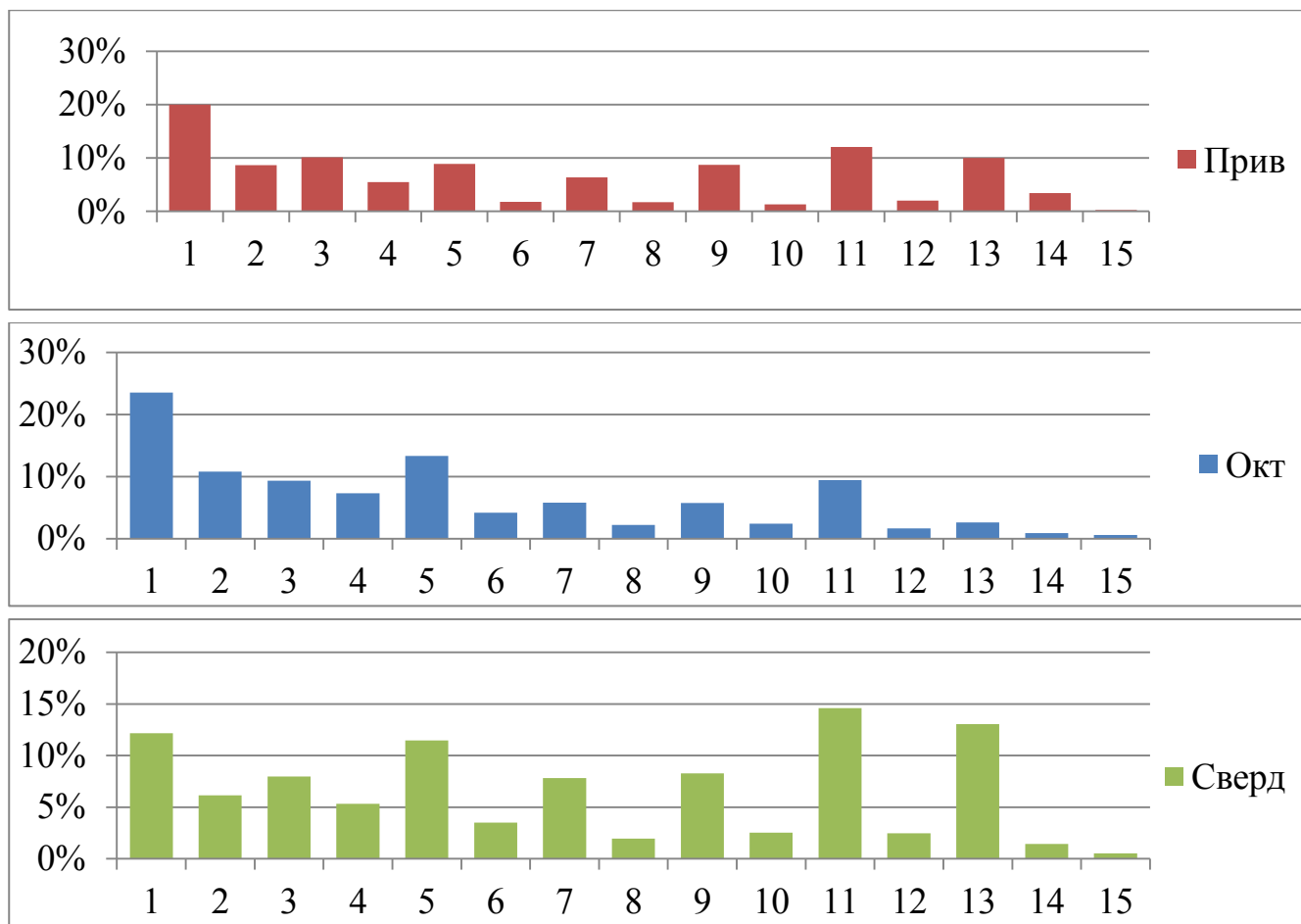


Рисунок 1 – Распределение времени работы по позициям контроллера машиниста:
Прив – Приволжская железная дорога; Окт – Октябрьская железная дорога;
Сверд – Свердловская железная дорога

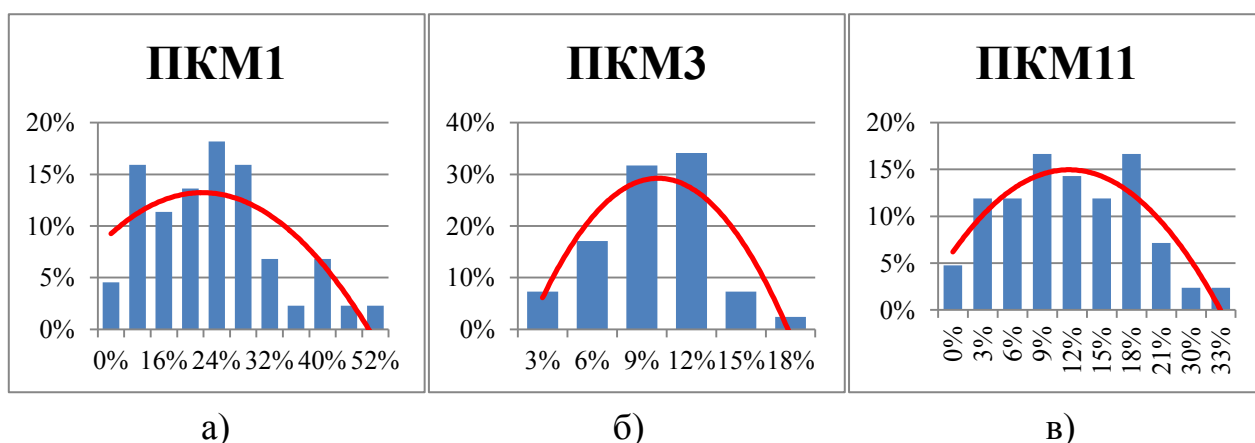


Рисунок 2 – Результаты проверки распределения времени работы по позициям контроллера на соответствие нормальному закону:
а – на ПКМ1, б – на ПКМ3, в – на ПКМ11

Анализ работы, выполненной тепловозами по позициям контроллера, приведённый на рисунке 3 показал несколько иные результаты: при сохранившемся преобладании нечётных позиций над чётными для всех железных дорог, наибольшая работа на Приволжской и Свердловской железных дорогах выполняется на ПКМ 11 и 13, в то время как для Октябрьской железной дороги более характерны ПКМ 5 и 11.

Анализ соответствия распределения нормальному закону, приведённый на рисунке 4 показал, что распределение работы, проделанной всеми наблюдаемыми локомотивами на ПКМ 11 соответствует нормальному закону с вероятностью 0,85 (рисунок 4а). Анализ соответствия распределения нормальному закону для ПКМ 13 и 5 показал низкую вероятность соответствия. По остальным позициям контроллера высокая вероятность соответствия была получена для ПКМ 7 на Приволжской железной дороге (рисунок 4б).

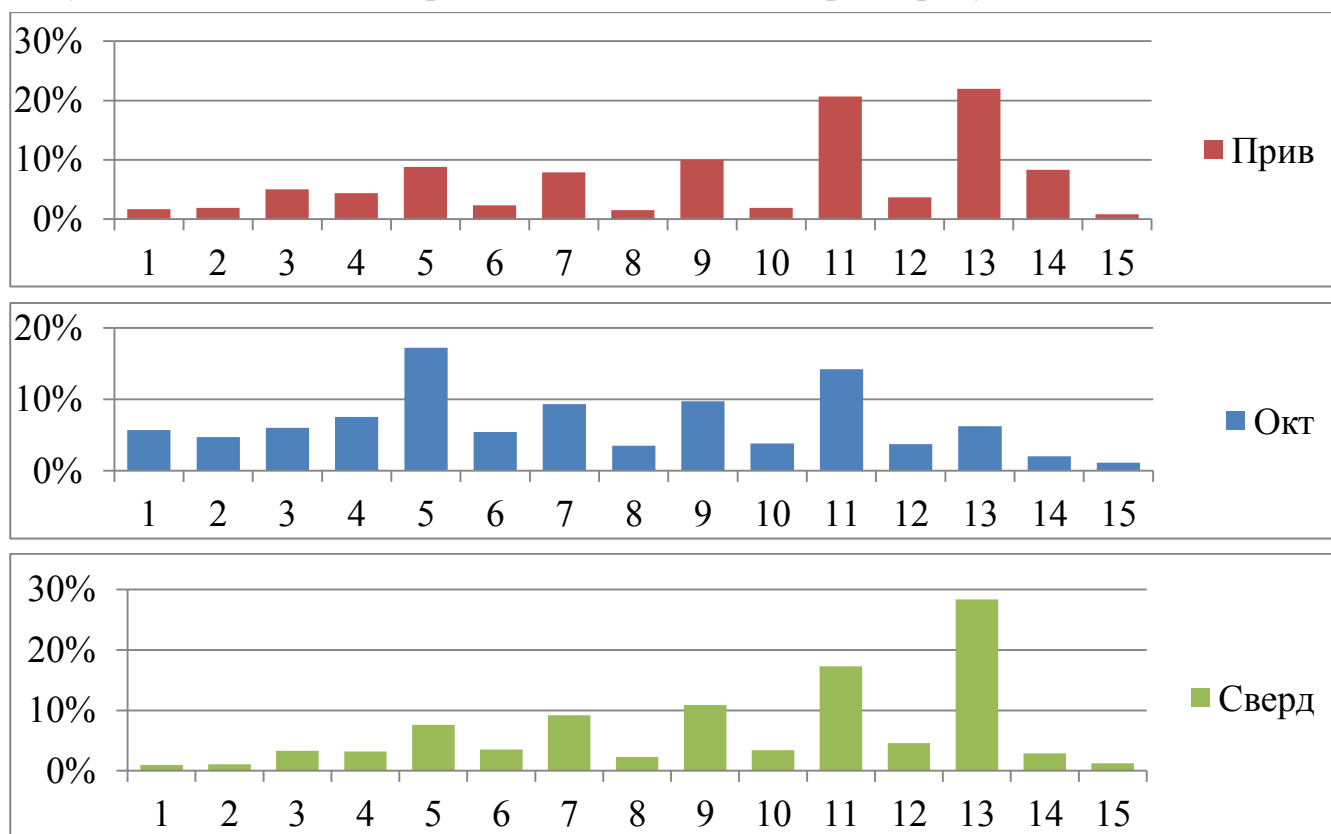


Рисунок 3 – Распределение работы проделанной локомотивами по позициям контроллера:

Прив – Приволжская железная дорога; Окт – Октябрьская железная дорога;
Сверд – Свердловская железная дорога

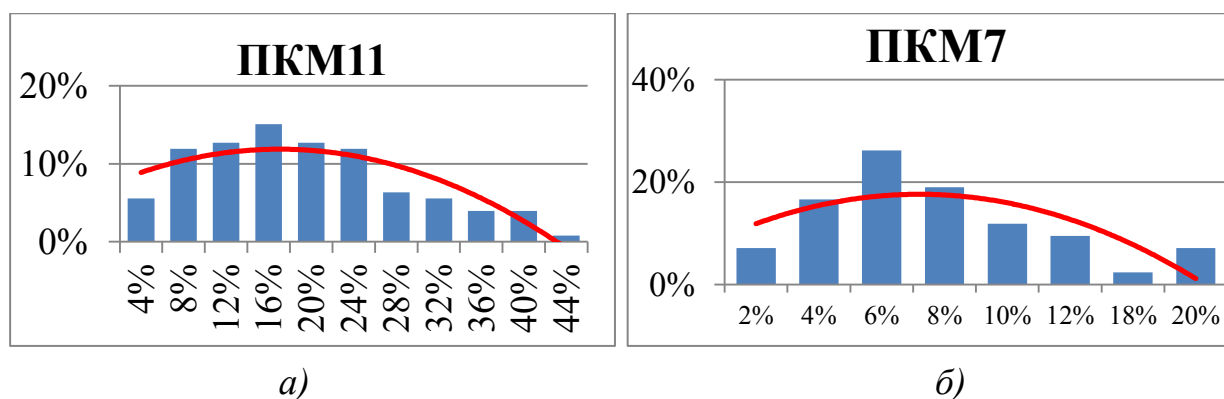


Рисунок 4 – Результаты проверки работы, проделанной по позициям контроллера на соответствие нормальному закону:

а – на ПКМ11, б – на ПКМ7

Также, в рамках исследования были проверены значения параметров токов тяговых электродвигателей (далее – ТЭД) и температур выхлопных газов.

Проверка токов ТЭД показала, что значения токов ТЭД в 10 – 100А как показано на рисунке 5а и 400 – 500А (на рисунке 5б) обладают высокой достоверностью – вероятности их подчинения нормальному закону составляют 0,89 и 0,8 соответственно.

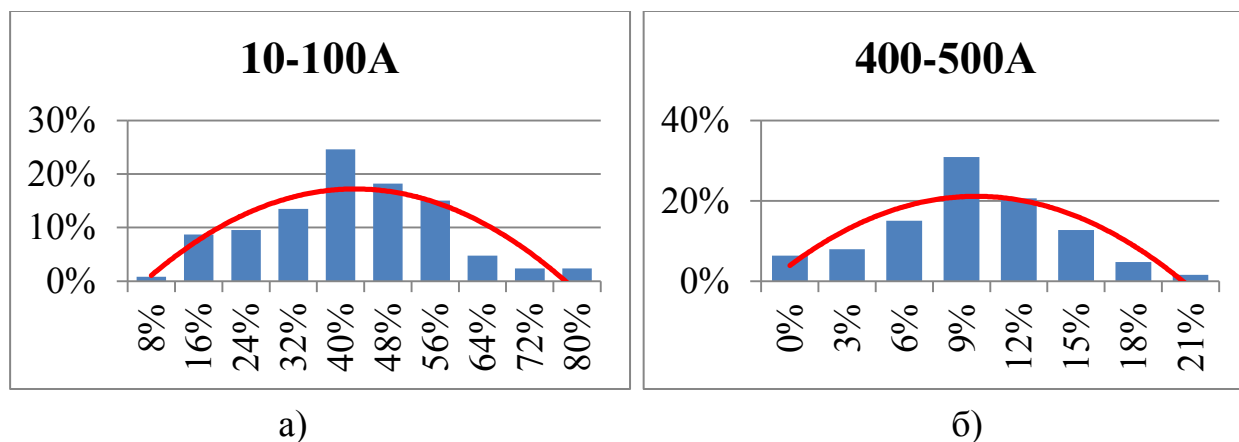


Рисунок 5 – Результаты проверки токов ТЭД на соответствие нормальному закону:

а – в диапазоне от 10 до 100А, б – в диапазоне от 400 до 500А

Поскольку высокая достоверность параметров тока ТЭД позволяет сделать вывод о правомерности применения методов диагностики с помощью корреляционного анализа, в дальнейшем исследовании был выполнен анализ взаимной корреляции токов ТЭД, результаты которого приведены на рисунке 6.

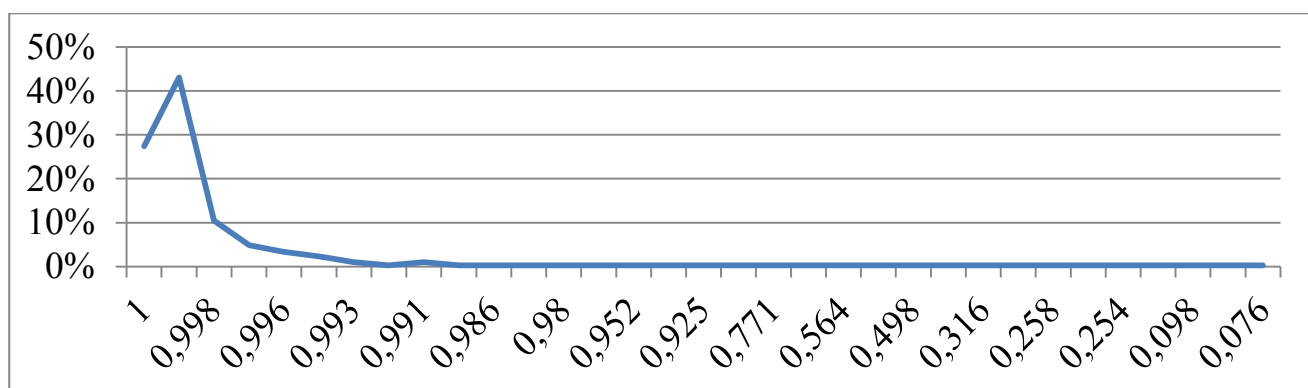


Рисунок 6 – Распределение коэффициента корреляции токов ТЭД

Анализ показал, что наиболее распространённое наблюдаемое значение коэффициента взаимной корреляции токов ТЭД составляет 0,999 (43% всех поездок), а значения в пределах 0,99 – 1 суммарно составляют 94% всех данных. Значения в пределах 0,91 – 0,98 составляют 1,8% поездок и соответствуют разовым отклонениям, а значения менее 0,92 составляют 4,1% поездок и соответствуют отсутствующему параметру тока ТЭД (отключенный электродвигатель или неисправный датчик). Это наблюдение полностью подтверждает существующую гипотезу [3] о высокой чувствительности параметра корреляции токов ТЭД к неисправностям электродвигателя.

Анализ значений температур выхлопных газов был затруднён в силу значительного (более 37%) количества тепловозов с частично или полностью неисправными комплектами датчиков температуры выхлопных газов. Тем не менее, как видно из рисунка 7 для тепловозов с исправными датчиками было выяснено, что температуры газов в диапазоне 200-500°C для Приволжской (рисунок 7а) и 200-300°C (рисунок 7б) для Октябрьской железной дороги обладают высокой достоверностью: вероятности соответствия их распределений нормальному закону составили 0,92 и 0,94 соответственно.

Анализ взаимной корреляции для температур выхлопных газов, выполненный для показаний с высокой достоверностью (приведён на рисунке 8) показал, что 71,5% времени наблюдаемый коэффициент корреляции находится в диапазоне от 0,94 до 1 (при этом, на коэффициент корреляции равный 1 приходится 40% данных). Наблюдаемые значения соответствуют нормальной работе дизеля.

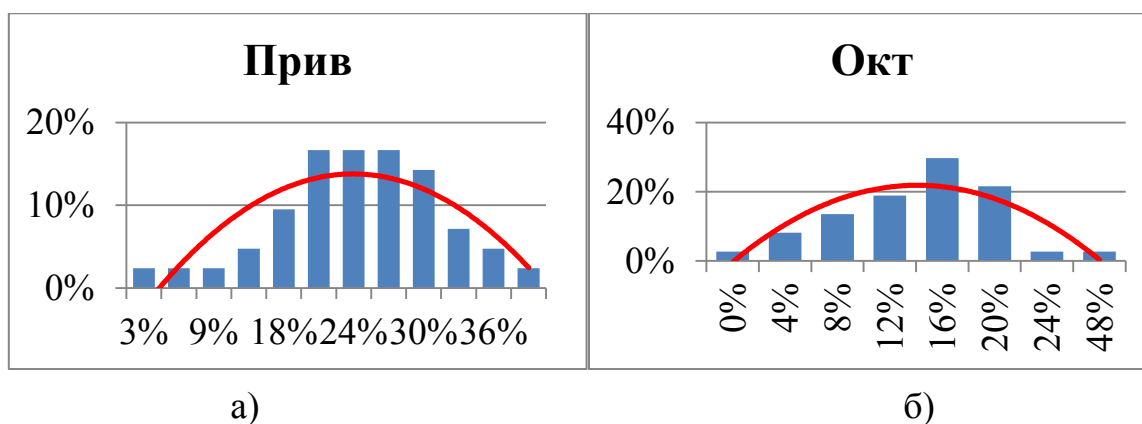


Рисунок 7 – Результаты проверки температур выхлопных газов на соответствие нормальному закону:

а – Приволжская железная дорога, б – Октябрьская железная дорога

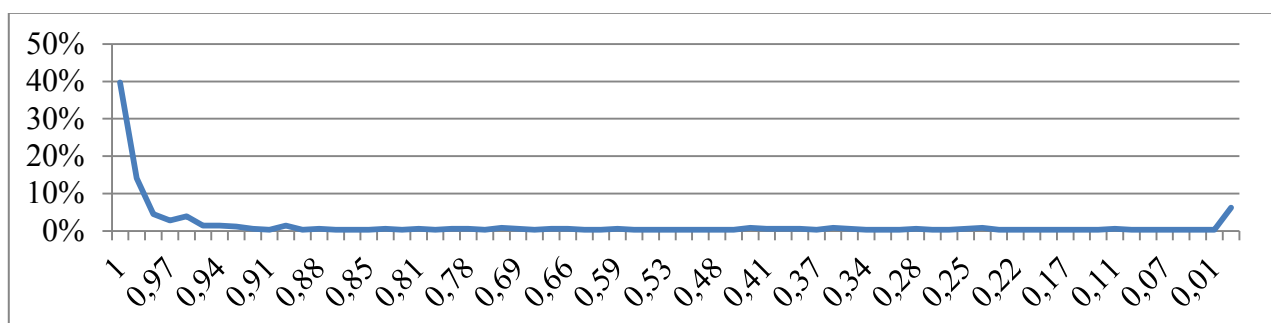


Рисунок 8 – Распределение коэффициента корреляции температур выхлопных газов

Значения коэффициента корреляции от 0,6 до 0,85 составляют 7,3% наблюдений и соответствуют неисправностям или нарушению настройки топливной аппаратуры, а значения менее 0,59 составляющие 21% наблюдений (из которых коэффициент корреляции равный 0 составляет 6%) – пропадающему сигналу датчиков температуры выхлопных газов (предотказное состояние датчика).

Причину выявления коэффициентов корреляции температур выхлопных газов в диапазоне 0,85 – 0,94 однозначно установить невозможно, однако среди наиболее вероятных причин можно выделить недостаточное поступление воздуха в цилиндры вследствие износа лопаток турбокомпрессора, неисправностей охладителя наддувочного воздуха или засорения воздушных фильтров.

Таким образом, при условии изначальной проверки данных на достоверность и качественного отсева показаний неисправных датчиков, применение методов диагностики однотипного оборудования при помощи

корреляционного анализа возможно не только для электрических машин, но и для топливной аппаратуры дизеля.

Научный руководитель – д.т.н., профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы», И. К. Лакин, РУТ (МИИТ)

Список литературы

1. Валиев, М. Ш. Повышение эффективности работы тепловозов средствами бортовых систем диагностирования / М. Ш. Валиев. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2011. – 161 с. – Текст : непосредственный.

2. Мониторинг технического состояния локомотивов. Теория и практика / К. В. Липа, А. А. Белинский, В. Н. Пустовой [и др.]. – Москва : ООО «Локомотивные технологии», 2015 – 212 С. – Текст : непосредственный.

3. Патент № 2626168 Российская Федерация, МПК G01M 13/00(2006.01). Способ технического диагностирования оборудования локомотивов и устройство для его осуществления : 2016135067 : заявлено 2016.08.29 : опубликовано 2017.06.15 / Липа К. В., Белинский А. А., Лянгасов С. Л., Аболмасов А.А., Лакин И.И., Мельников В.А. // Патент России № 2626168. 2015. Заявка № 2015156954/11.

4. Лакин, И. К. Умный локомотив – диагностирование тяговых электродвигателей тепловозов с использование методов машинного обучения / И. К. Лакин, В. В. Павлов, В. А. Мельников. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – № 6 (73). – С.38-41.

5. Пузанков, А. Д. Статистический методы обработки выборочных данных наблюдений или экспериментов. Ч.1. Методические указания / А. Д. Пузанков. – Москва : МИИТ, 2000. – 42с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Мельников Виктор Александрович
Российский университет транспорта
(РУТ(МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва,
127994, Российская федерация
Ассистент кафедры «Электропоезда и
локомотивы» РУТ (МИИТ).
Тел.: +7(916)949-31-61.
E-mail: Lordson@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Melnikov Viktor Aleksandrovich
Russian University of Transport (RUT(MIIT)).
9b9 Obrazcova Ulitsa, Room 1301, Moscow,
127994, the Russian Federation.
Assistant of the Department of "Electric Trains
and Locomotives" RUT(MIIT).
Phone.: +7(916)949-31-61.
E-mail: Lordson@yandex.ru.

О. В. Пиндюк

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

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ В ТЯГОВОЙ РЕЛЬСОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Проведен анализ существующих методик определения потерь в тяговой рельсовой сети постоянного тока электрифицированного железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: потери мощности, обратная тяговая сеть, блуждающие токи, сеть постоянного тока, потенциал.

Olga V. Pindyuk

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

ANALYSIS OF EXISTING METHODS FOR DETERMINING LOSSES IN A DC TRACTION RAIL NETWORK

The analysis of the existing methods for determining the losses in the DC traction rail network of electrified railway transport.

Keywords: power loss, reverse traction network, stray currents, DC network, potential.

Увеличение интенсивности движения поездов при электрической тяге постоянного тока сопровождается ростом потерь мощности, которые состоят из потерь:

- в понижающих трансформаторах тяговых подстанций,
- в преобразовательных трансформаторах тяговых подстанций,
- в сглаживающих фильтрах тяговых подстанций,
- в тяговой сети,
- энергии ЭПС.

Наиболее общей является методика экспертных аналитических оценок распределения потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения и

на электрическом составе [1]. Она включает в себя оценку потерь в понижающих трансформаторах тяговых подстанций, потерь в преобразовательных трансформаторах тяговых подстанций, потерь в сглаживающих фильтрах тяговых подстанций, погрешность учета приема и отпуска электроэнергии по шинам тяговых подстанций на тягу поездов, потерь в контактной сети, потерь в рельсовой цепи, погрешность учета электроэнергии на электроподвижном составе, потерь электроэнергии в пусковых резисторах, в тяговом двигателе и на собственные нужды электроподвижного состава, оценочную величину совокупных потерь на технологические операции. При этом потери в тяговой рельсовой сети составляют: потери в контактной сети – от 2 до 4%, потери в рельсовой цепи – от 0,5 до 2 %. В работе [1] перечислены основные факторы, влияющие на потери в тяговой сети: в случае потерь в контактной сети: сопротивление контактной подвески, качество токосъема, техническая скорость движения поездов, массы поездов и режим ведения, предупреждения, не предусмотренные графиком остановок поездов, мощности ЭПС, профиля пути; в случае потерь в рельсовой цепи: те же, что и для контактной сети, сопротивление рельсовой цепи, количество и типы применяемых дроссель-трансформаторов в рельсовой цепи, виды соединений в рельсовой цепи, неудовлетворительное содержание элементов цепи. Все это может привести к увеличению потерь в два раза.

Так как рельсы, лежащие на шпалах и балласте, неидеально изолированы от земли, поэтому часть обратного тягового тока возвращается на тяговую подстанцию по земле как параллельному проводнику. Токи, стекающие с рельсов, в земле создают поле блуждающих токов, оказывающих влияние на подземные сооружения: трубопроводы, заземляющие устройства тяговой подстанции, электрические кабели, в следствие чего они в свою очередь подвергаются коррозии [2]. В работе [1] в факторах, влияющих на потери в тяговой цепи, подземные сооружения не указаны.

Известен косвенный метод определения потерь энергии в тяговой цепи с помощью специализированной имитационной модели и статистического анализа [3]. В методике используются расчетные схемы к определению эквивалентного сопротивления тяговой цепи при одной и при двух нагрузках в межподстанционной зоне и формулы для расчета потерь электроэнергии для этих схем. Потери энергии находятся с помощью тока нагрузки, удельного

сопротивления тяговой сети за расчетный период времени. В работе [3] сделан вывод, что при прочих равных условиях эквивалентное сопротивление и потери электроэнергии меняются в зависимости от того, где расположены нагрузки, и от значения их величин, и если бы было известно эквивалентное сопротивление на каждый момент времени, то можно было организовать контроль потерь электрической энергии в тяговой сети. Предложено решение задачи определения потерь энергии с помощью имитационной модели системы тягового электроснабжения, ядро которой построено на решении схем матричным способом. Оно реализовано в программе, которая создает графики движения поездов, учитывает изменение тока поезда, колебания напряжения на шинах тяговой подстанции. На основании полученных показателей можно узнать количество годовых потерь электроэнергии, а по ним вычислить удельную величину потерь электроэнергии, с помощью которой определить оптимальные параметры контактной сети при проектировании новых участков железной дороги. В данной работе не учитывается влияние подземных сооружений на общие потери и величина удельных потерь электроэнергии берется усредненная.

Имеется методика экспериментального определения потерь в обратной тяговой сети постоянного тока [4]. Предварительно производился расчет сопротивления тяговой сети. В результате расчета составляющих потерь в тяговой сети для случая с односторонней нагрузкой в фидерной зоны, сопротивление обратной тяговой сети изменяется в пределах от 0,114 Ом до 0,123 Ом, что составило 16,8% и 17,9% от сопротивления тяговой сети. Для определения фактических потерь электрической энергии был выполнен мониторинг и установлен блок регистрации токов и напряжения (БРТН), также БРТН был установлен на шины 3,3 кВ для мониторинга уровня напряжения в контактной сети. Для оценки потенциала рельс-земля были установлены вольтметры между электродами, имеющий потенциал «удаленной земли», средней точкой дроссель-трансформатора (ДТ), на которой установлен отсос и ДТ на входном сигнале нечетной горловины. Вычисления составляющих потерь в тяговой сети были выполнены исходя из результатов проведенных измерений потенциалов, синхронизированных с данными БРТН. Экспериментальные данные показали, что доля потерь энергии в обратной

тяговой сети составляет 20,0 – 20,1 % от общих потерь и выше расчетных. Авторы объясняют это превышением фактического удельного переходного сопротивления между землей и рельсами над расчетными значениями.

Измерения проводились в зимний период времени, при этом ток течет по рельсам вследствие того, что грунт имеет более высокое сопротивление из-за промерзания. В летний период соотношение между током, протекающим по рельсам, и током, стекающим в землю, будет другим, это необходимо учесть в методике. Также не было рассмотрено влияния подземных сооружений на общие потери.

В работе [5] рассмотрен вопрос учета потерь на добавочном сопротивлении дренажной установки тяговой подстанции постоянного тока. Произведен расчет общих потерь мощности в тяговой рельсовой сети для среднего значения тока подстанции, который вычисляется исходя из суммы потерь на добавочном сопротивлении дренажной установки и произведения тока тяговой подстанции на потенциал в точке подключения заземляющего устройства тяговой подстанции. Сделан вывод о том, что при увеличении добавочного сопротивления большой процент тока возвращается на тяговую подстанцию по рельсам, в следствии чего уменьшается риск развития коррозии, а также приводит к увеличению потерь в тяговой рельсовой сети. При выборе значения добавочного сопротивления дренажной установки стоит руководствоваться двумя критериями: защитным потенциалом заземляющего устройства тяговой подстанции и потерями мощности в обратной тяговой сети.

Произведя анализ различных методов определения потерь в тяговой рельсовой сети, можно сделать вывод о том, что при определении потерь в большинстве случаев не учитываются потери, которые связаны с подземными сооружениями, расположенными вдоль железнодорожного пути, а также не учитываются сезонные условия.

Следовательно, существует необходимость разработки метода определения потерь в тяговой рельсовой сети с учетом подземных металлических сооружений, расположенных вдоль железнодорожных путей.

Список литературы

1. Истомин, С. Г. Оценка составляющих потерь электроэнергии электроподвижным составом и устройствами электроснабжения / С. Г. Истомин,

А. Е. Перестенко. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 387-396.

2. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог : учебник / К. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт, 1982. – 582 с. – Текст : непосредственный.

3. Кузнецов, В. Г. Оценка потерь электроэнергии в тяговой сети магистральных железных дорог / В. Г. Кузнецов, Р. С. Мыцко, Д. А. Босый. – Текст : непосредственный // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. – 2007. – №18 – С. 34-37.

4. Черемисин, В. Т. Экспериментальное определение потерь электрической энергии в обратной тяговой сети на электрифицированном участке постоянного тока / В. Т. Черемисин, В. А. Кващук, П. В. Тарута. – Текст : непосредственный // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : всероссийская научно-техническая конференция с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013.– С.277-282.

5. Кандаев, В. А. Определение оптимального значения добавочного сопротивления дренажной установки тяговой подстанции постоянного тока / В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, А. А. Медведева, А. В. Уткина. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2016.–№3 (27) – С. 83-91.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Пиндюк Ольга Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д.35, г. Омск, 644041,

Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение железных дорог» ОмГУПС.

Тел.: +7 9087997856.

E-mail: hffjffn@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pindyuk Olga Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., 35, Omsk, 644041,

the Russian Federation.

Post-graduate student of the Department of Power Supply of Railways OSTU.

Phone: +7 9087997856.

E-mail: hffjffn@gmail.com.

И. Ю. Хромов

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

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЛОКОМОТИВА

Современный подвижной состав невозможно представить без бортовых микропроцессорных систем управления (МСУ), изначально созданных для управления тяговым приводом локомотивов, а в настоящее время используемых также и для диагностики технического состояния локомотивов. С 2012 года в сервисных локомотивных депо группы компаний «ЛокоТех» производится расшифровка и анализ данных поездки локомотивов, выявлены многочисленные случаи нарушений режимов эксплуатации. Автором, на основании эксплуатационных данных локомотивов, обслуживаемых группой компаний «ЛокоТех», выполнен корреляционный анализ взаимного влияния нарушений режимов эксплуатации и ухудшения технического состояния локомотивов.

Ключевые слова: нарушение режимов эксплуатации, техническое состояние локомотива, корреляционный анализ, бортовая диагностика, техническое обслуживание и ремонт.

Igor Yu. Khromov

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

METHOD FOR DETERMINING THE EFFECT OF OPERATING MODES ON THE TECHNICAL CONDITION OF THE LOCOMOTIVE

Modern rolling stock cannot be imagined without on-Board microprocessor control systems (MCSs), which were originally created to control the traction drive of locomotives, and are currently also used to diagnose the technical condition of locomotives. Since 2012, Locotech group's locomotive service depots have been deciphering and analyzing locomotive trip data, and numerous cases of violations of operating modes have been identified. Based on the operational data of locomotives serviced by the Locotech group of companies, the author performed a correlation analysis of the mutual influence of violations of operating modes and deterioration of the technical condition of locomotives.

Keywords: violation of operating modes, technical condition of the locomotive, correlation analysis, on-Board diagnostics, maintenance and repair.

Введение. Сервисная система обслуживания локомотивов, организованная в нашей стране благодаря реформе железнодорожного комплекса, при которой сервисная компания получает прибыль не за количество ремонтов, а за пробег локомотива, способствовала повышению внимания к системе технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) локомотивов, а также развитию систем диагностики локомотивного оборудования. Во второй половине первого десятилетия XXI века на российских железных дорогах появились новые отечественные локомотивы, оснащённые бортовыми микропроцессорными системами управления. Начиная с 2012 года, используя функциональные возможности бортовых МСУ (запись и хранение данных о поездке во внутренней памяти устройства), специалисты группы диагностики сервисных локомотивных депо (СЛД) группы компаний «ЛокоТех» осуществляют расшифровку и анализ данных телеметрии [1]. Выявлены многочисленные случаи несоблюдения локомотивными бригадами требований руководств по эксплуатации – так называемые нарушения режимов эксплуатации.

Анализ статистических данных. На основании накопленных группами диагностики данных, автором произведён статистический анализ информации по нарушениям режимов эксплуатации (НРЭ) и неплановым ремонтам локомотивам, обслуживаемых в СЛД группы компаний «ЛокоТех» за 12 месяцев эксплуатации. Выявлены группы оборудования, отказ которых наиболее часто является причиной захода локомотива на неплановый ремонт: среди тепловозов около половины неплановых ремонтов происходит по причине неисправности дизеля и дизельного оборудования (рисунок 1).

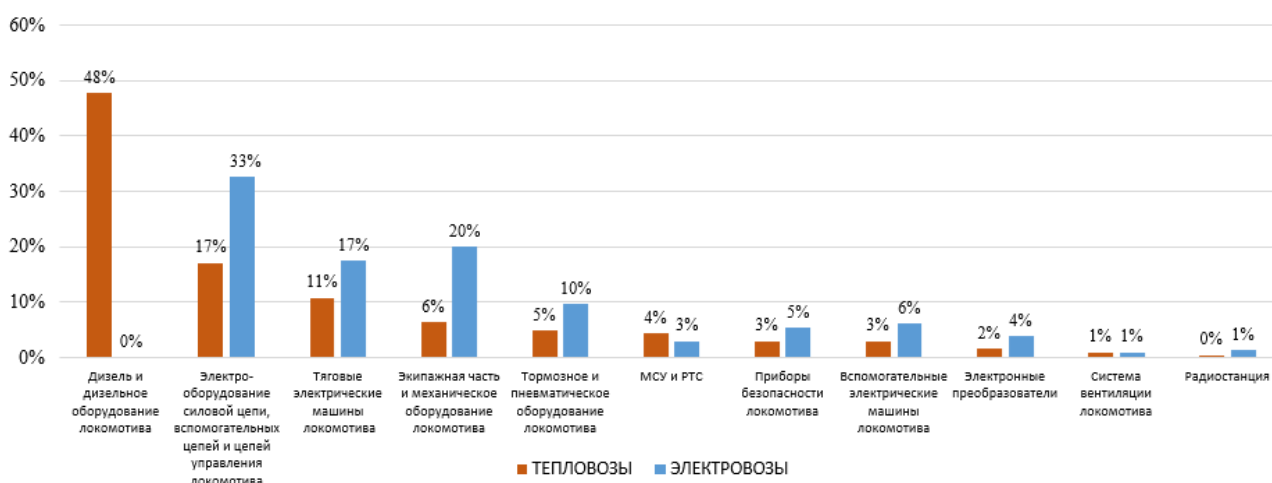


Рисунок 1 – Неисправности оборудования, являющиеся причиной захода на неплановый ремонт

Также, используя диаграмму Парето, проанализированы самые распространённые нарушения режимов эксплуатации (рисунок 2).

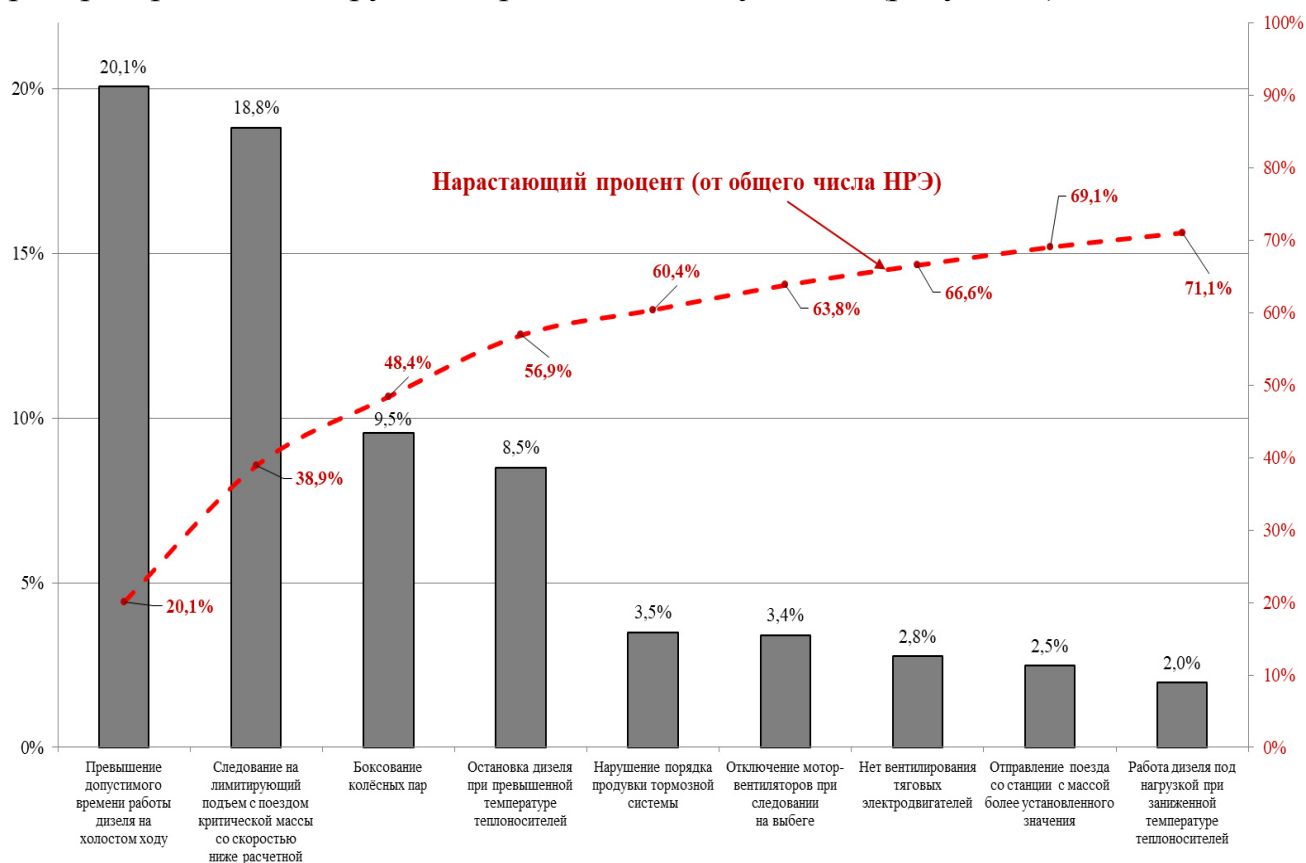


Рисунок 2 – Самые распространённые нарушения режимов эксплуатации

Корреляционный анализ. С целью подтверждения негативного влияния нарушений на техническое состояние локомотивов и с учётом вышеприведённой информации, автором по всем сериям локомотивов с актуальными нарушениями произведён корреляционный анализ самого факта нарушения и дополнительных (сверхцикловых) работ, а также факта нарушения и стоимости работ. По результатам анализа была подтверждена сильная корреляционная зависимость между исследуемыми параметрами. Для проведения более детального корреляционного анализа были выбраны отдельные нарушения, а также различные условия сравнения данных параметров (по видам ремонта и видам назначенных работ). Результаты анализа приведены в таблице 1 – по большинству зависимостей с учётом разных условий анализа выявлена сильная корреляционная зависимость (коэффициент корреляции более 0,7).

Результаты корреляционного анализа

№ п/п	Область сравнения (отборы/фильтры)	№ п/п	Сравниваемые параметры	Коэффициент корреляции	
				НРЭ - доп работы	НРЭ - стоимость работ
1	По всем сериям и НРЭ локомотивов (без фильтров)	1.1	Все виды работ и ремонта	0,8723	0,6325
		1.2	Все виды работ, без ТО-2	0,9267	0,7016
		1.3	Все виды ремонта, сверхцикловые работы	1,0000	0,9080
2	По всем сериям, оборудованным МСУ (без фильтра по НРЭ)	2.1	Все виды работ и ремонта	0,8535	0,5970
		2.2	Все виды работ, без ТО-2	0,9156	0,6784
		2.3	Все виды ремонта, сверхцикловые работы	1,0000	0,9162
3	По замечанию (следование по лимитирующему подъёму со скоростью ниже установленной)	3.1	Все виды работ и ремонта	0,8517	0,8379
		3.2	Все виды работ, без ТО-2	0,8745	0,8025
		3.3	Все виды ремонта, сверхцикловые работы	1,0000	0,8422
4	По замечанию (длительная работа на холостом ходу)	4.1	Все виды работ и ремонта	0,8361	0,7460
		4.2	Все виды работ, без ТО-2	0,9281	0,8933
		4.3	Все виды ремонта, сверхцикловые работы	1,0000	0,6070
5	По замечанию (боксование колёсных пар)	5.1	Все виды работ и ремонта	0,7684	0,5085
		5.2	Все виды работ, без ТО-2	0,8782	0,5764
		5.3	Все виды ремонта, сверхцикловые работы	1,0000	0,8741
6	По замечанию (запуск/эксплуатация/остановка дизеля с нарушением температурного режима)	6.1	Все виды работ и ремонта	0,5649	0,3137
		6.2	Все виды работ, без ТО-2	0,7888	0,5367
		6.3	Все виды ремонта, сверхцикловые работы	1,0000	0,5879
7	По замечанию (юз колёсных пар)	7.1	Все виды работ и ремонта	0,9786	0,8367
		7.2	Все виды работ, без ТО-2	0,9887	0,7756
		7.3	Все виды ремонта, сверхцикловые работы	1,0000	0,8943

Таким образом, результаты статистического и корреляционного анализа, выполненных при использовании значительного объёма данных за большой период эксплуатации локомотивов, позволяют судить о наличии чёткой причинно-следственной между нарушениями режимов эксплуатации и ухудшением технического состояния локомотивов, то есть снижением показателей их надёжности [2].

Практическая значимость. На основании вышеописанного, автором проанализированы физические процессы, приводящие к ухудшению технического состояния локомотивного оборудования из-за нарушений режимов эксплуатации. По каждому наименованию нарушений режимов эксплуатации приведена статистика в виде диаграммы Парето о количестве случаев нарушений с разбивкой по сериям локомотивов, а также о количестве unplanned ремонтов, произошедших из-за конкретного нарушения. На основании данной информации определены предрасположенности к отказу локомотивного оборудования из-за нарушений режимов эксплуатации.

С учётом выявленных предрасположенностей и вышеприведённой информации, автором составлена матрица влияния нарушений на различные локомотивные серии – рисунок 3.

Значения в ячейках матрицы проставлялись только в случае, если в диаграмме Парето по неплановым ремонтам, произошедшим из-за конкретного нарушения, серия находится в области 80%, то есть существенно подвержена негативному влиянию.

Группа оборудования	Наименование нарушения режима эксплуатации	Наиболее подверженные влиянию НРЭ серии локомотивов (на которые приходится 80% от общего числа по каждому НРЭ)																																
		Тепловозы																		Электровозы								Итого						
		пасс	грузовые								маневровые							грузовые					пассажирские											
			ТЭП10У(ВС)	2ТЭ116	2(3)ТЭ116У	2ТЭ116УД	2(3)ТЭ10МК	2(3)ТЭ10М	2(3)ТЭ10УК	2(3)ТЭ10У	2ТЭ25КМ	2ТЭ25А	2М62	ТЭМ18ДМ	ТЭМ18Д	ТЭМ2	ТЭМ2А	ТЭМ2А	ЧМЭ3	2(3)ЭС5К	2(3)ЭС4К	ВЛ80С	ВЛ80Р	ВЛ80ТК	ВЛ80Т	ВЛ85	ЭП1М(П)		ЭП1	ЧС7				
Дизель и дизельное оборудование	Длительная работа на холостом ходу	x		x		x	x		x																				5					
	Остановка дизеля при превышенной температуре теплоносителей			x		x	x			x																			4					
	Работа дизеля под нагрузкой при заниженной температуре теплоносителей			x		x	x	x																					4					
	Работа дизеля под нагрузкой при превышенной температуре теплоносителей			x		x	x	x			x																		5					
	Запуск дизеля без прокачки масла	ухудшение технического состояния в долгосрочной перспективе																																
Тяговые электрические машины	Следование на лимитирующий подъем со скоростью ниже расчётной					x														x		x		x					4					
	Отключение мотор-вентиляторов в режиме выбега или тяги																		x		x								2					
	Перегрузка ТЭД по токам/напряжениям																		x		x								2					
	Превышение допустимых значений токов тягового генератора	ухудшение технического состояния в долгосрочной перспективе																																
Электрооб-е и вспом-е машины	После остановки дизеля не выключен рубильник аккумуляторной батареи	ухудшение технического состояния в долгосрочной перспективе																																
Колёсно-моторный блок	Непринятие мер по случаю боксования колёсных пар					x													x		x		x	x	x				6					
	Применение крана вспомогательного тормоза в тяге																	x	x	x	x			x	x				6					
	Юз колёсных пар		x	x	x														x		x	x			x				7					
	Отключение автоматической подсыпки песка																		x								x		2					
Итого:		1	1	5	1	6	4	2	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	6	1	6	1	2	2	4	0	1	0	0					

Рисунок 3 – Матрица влияния нарушений режимов эксплуатации на локомотивы

Практическая значимость данной матрицы заключается в возможности определения (по скоплению красных зон) необходимой очерёдности разработки корректирующих мероприятий (способы предотвращения или устранения нарушений) как по группам оборудования, так и по сериям локомотивов.

Предотвратить негативные последствия нарушений режимов эксплуатации возможно путём доработки программного обеспечения бортовых МСУ и внедрения в них алгоритмов защиты от опасных режимов эксплуатации, которые не позволят локомотивным бригадам осуществить выход за установленные пределы значения контролируемых параметров [3].

Заключение. Таким образом, метод определения влияния нарушений режимов эксплуатации на техническое состояние локомотивов представляет собой своевременный анализ информации (статистический с использованием диаграмм Парето и корреляционный) и актуализацию матрицы влияния нарушений на локомотивы.

Результатом теоретических исследований являются практические решения, направленные на поддержание технического состояния локомотивов на заданном уровне:

1. На основании большого объёма данных выполнен статистический и корреляционный анализ, которые, наряду с анализом физических процессов, позволили определить чёткие зависимости между фактом нарушения и ухудшением технического состояния оборудования локомотивов.

2. Разработана матрица влияния нарушений режимов эксплуатации на локомотивы, позволяющая объективно и оптимально реагировать на актуальную ситуацию по влиянию НРЭ на локомотивное оборудование.

3. Предложены методы предотвращения негативных воздействий от нарушений режимов эксплуатации – путём внедрения специальных защитных алгоритмов в программное обеспечение бортовых МСУ.

Научный руководитель – д.т.н., профессор кафедры «Электropоезда и локомотивы» И. К. Лакин, РУТ (МИИТ)

Список литературы

1. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика. / К. В.Липа, А.А.Белинский, В.Н. Пустовой [и др.] ; под общей редакцией И. К. Лакина. – Москва : ООО «Локомотивные Технологии», 2015. – 212 с. – Текст : непосредственный.

2. Надежность тепловозов : учебное пособие / В. Г. Кочерга. – Хабаровск : Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2012. – 66 с.: ил. – Текст : непосредственный.

3. Комплексный мониторинг режимов эксплуатации локомотивов и предложения по совершенствованию бортовых МСУ, исключаяющие ошибочные действия локомотивных бригад : отчет о НИР (промежуточ.) : руководитель Лакин И. К. : исполнители : Хромов И.Ю. [и др.] / ООО «ЛокоТех» – Москва, 2019. – 211 с. – РТЛС.003.002.001.006К.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Хромов Игорь Юрьевич

Российский университет транспорта
(РУТ(МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва,
127994, Российская федерация

Аспирант кафедры «Электропоезда и
локомотивы» РУТ(МИИТ).

E-mail: KhromovIYu@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Khromov Igor Yurievich

Russian University of Transport (RUT(MIIT)).
9b9 Obrazcova Ulitsa, Room 1301, Moscow,
127994, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department
"Electric trains and locomotives"

RUT (MIIT).

E-mail: KhromovIYu@yandex.ru

УДК 629.423: 621.331.3.025.1:621.311.004.18

А. А. Бакланов, Н. В. Есин, А. П. Шиляков

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

ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГЕТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Рассмотрены основные энергетические параметры электроподвижного состава переменного тока, который является потребителем активной, реактивной и полной электрической энергии. Дана оценка коэффициента мощности, характеризующего потребление реактивной энергии. Оценены потери активной энергии в системе тягового электроснабжения от протекания реактивной энергии. Приведены эксплуатационные энергетические показатели электровозов переменного тока. Сформулированы способы сокращения потребления реактивной энергии электроподвижным составом переменного тока.

Ключевые слова: электроподвижной состав переменного тока, реактивная энергия, коэффициент мощности, потери энергии.

Alexander A. Baklanov, Nikolaj V. Esin, Andrey P. Shilyakov

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

FEATURES OF AC ELECTRIC TRACTION POWER ENGINEERING

The main energy parameters of the AC electric rolling stock, which is a consumer of active, reactive and total electric energy, are considered. The estimation of the power factor that

characterizes the consumption of reactive energy is given. The losses of active energy in the traction power supply system from the flow of reactive energy are estimated. Operational energy indicators of AC electric locomotives are given. Ways to reduce the consumption of reactive energy by AC electric rolling stock are formulated.

Keywords: of AC electric rolling stock, reactive energy, power factor, loss of energy.

В отличие от системы электрической тяги постоянного тока, в которой электроподвижной состав (ЭПС) потребляет только активную энергию (мощность) и преобразует ее в механическую энергию (мощность), используемую непосредственно для движения поездов, в системе электрической тяги переменного тока ЭПС потребляет также реактивную энергию (мощность). Реактивная энергия, как известно, не преобразуется в механическую энергию, она является обменной энергией и циркулирует в тяговой сети между тяговыми подстанциями и ЭПС, вызывая дополнительные потери в ней.

Относительным энергетическим показателем потребления реактивной энергии (мощности) является, как известно, коэффициент мощности ЭПС. Обычно коэффициент мощности ЭПС переменного тока рассматривают с точки зрения схемы выпрямления переменного тока на ЭПС [1-5]. Это позволяет оценить эффективность и обосновать использование схем и способов выпрямления переменного тока, позволяющих получить наиболее высокий коэффициент мощности ЭПС.

С общих позиций электрической тяги переменного тока целесообразно рассматривать основные энергетические параметры ЭПС как потребителя электрической энергии, используя известные понятия активной P , реактивной Q и полной S мощностей. Такой подход в настоящее время представляется возможным использовать в связи с появлением современных измерительных устройств однофазного переменного тока в виде электронных счетчиков электроэнергии типа Альфа, позволяющих регистрировать активную и реактивную энергии.

При этом коэффициент мощности ЭПС характеризуется выражением [6]

$$\chi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{I}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q}{P}\right)^2}} = \frac{I}{\sqrt{1 + q^2}}, \quad (1)$$

где $q = Q/P$ – коэффициент, характеризующий соотношение реактивной и активной мощностей.

После преобразования выражения (1) получим

$$q = \sqrt{\frac{1}{\chi^2} - 1}. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что отношение реактивной к активной мощности возрастает обратно пропорционально коэффициенту мощности.

Протекание в системе тягового электроснабжения (СТЭ) реактивной электроэнергии так же, как и активной, вызывает в ней потери активной электроэнергии, при этом для оценки суммарных потерь электроэнергии в СТЭ можно воспользоваться выражением [6]

$$\Delta A_{\Sigma} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} RT, \quad (3)$$

где U – напряжение в контактной сети;

R – активное сопротивление тяговой сети;

T – время потребления электроэнергии.

После преобразования выражения (3) получим формулу для определения суммарных потерь мощности в СТЭ

$$\Delta P_{\Sigma} = \frac{P^2}{U^2} (1 + q^2) R = \Delta P (1 + q^2), \quad (4)$$

при этом потери в СТЭ от протекания активной мощности характеризуются выражением

$$\Delta P = \frac{P^2}{U^2} R. \quad (5)$$

После преобразования выражений (4) и (5) с учетом (2) получим выражение для коэффициента, характеризующего увеличение потерь активной мощности в СТЭ от протекания реактивной мощности,

$$\beta_Q = \frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P} = 1 + q^2 = \frac{1}{\chi^2}. \quad (6)$$

С использованием выражений (1), (2), (6) рассчитаны и на рисунке 1 построены зависимости $\chi(q)$, $q(\chi)$, $\beta_Q(\chi)$.

Из анализа рисунка 1, а видно, что при относительно небольшом потреблении реактивной мощности, характеризуемым коэффициентом q , коэффициент мощности χ снижается незначительно и даже при $q = 0,4$ реализуется достаточно высокий коэффициент мощности $\chi = 0,93$. Большое

потребление реактивной мощности при $q > 0,4$ приводит к значительному снижению коэффициента мощности.

Кривые на рисунке 1, б показывают, что при реализации коэффициента мощности $\chi = 1,0$ отсутствует потребление реактивной мощности, то есть $q = 0$, и при этом коэффициент увеличения потерь активной мощности в СТЭ от протекания реактивной мощности $\beta_Q = 1,0$. При увеличении потребления реактивной мощности существенно снижается коэффициент мощности и возрастают потери в СТЭ. Например, когда потребляемая реактивная мощность равна активной, то есть $q = 1$, коэффициент мощности снижается до $\chi = 0,707$ и потери в СТЭ возрастают в два раза, так как $\beta_Q = 2$.

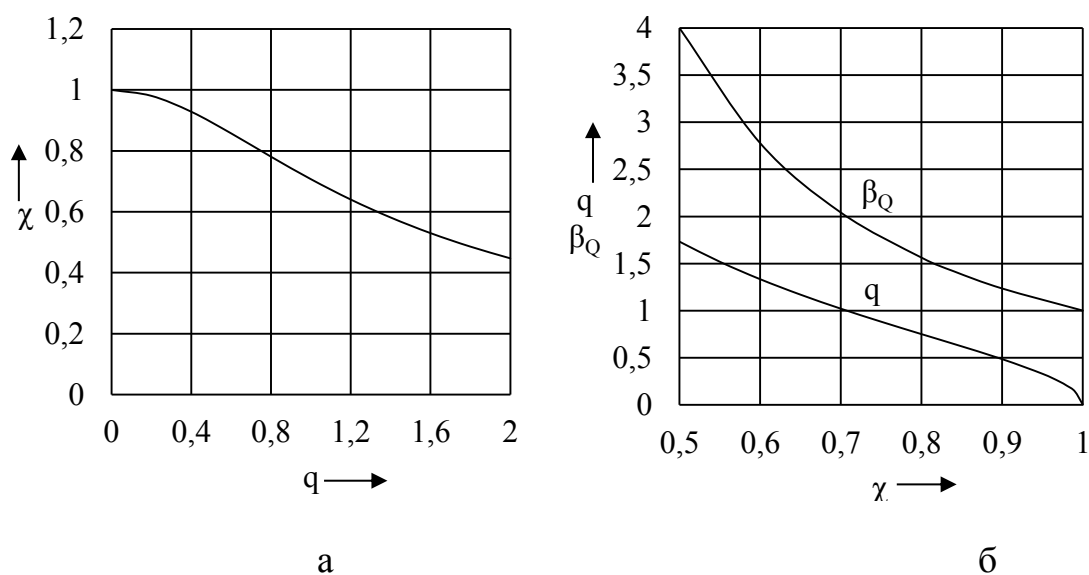


Рисунок 1 – Зависимости $\chi(q)$, $q(\chi)$, $\beta_Q(\chi)$

Согласно техническим данным эксплуатируемого ЭПС переменного тока в номинальном режиме тяги коэффициент мощности должен быть не менее $\chi = 0,84$ [4], при этом потребление реактивной мощности составляет 0,64 от активной мощности и потери в СТЭ возрастают в 1,42 раза. Анализ результатов длительных наблюдений в эксплуатационных условиях за двумя электровозами переменного тока ВЛ85, оснащенных электронными счетчиками Альфа, позволяющими регистрировать активную и реактивную энергии в обоих направлениях, показывает, что в режимах тяги и выбега, т. е. потребления электроэнергии, коэффициент мощности находится в основном в диапазоне 0,77...0,82, а в режиме рекуперативного торможения, то есть возврата электроэнергии в СТЭ, – в диапазоне 0,68...0,75.

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к вновь создаваемому ЭПС переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями, его коэффициент мощности должен быть не менее $\chi = 0,95 \dots 0,99$. В этом случае потребление реактивной мощности снизится до $0,33 \dots 0,14$ от активной мощности и потери в СТЭ возрастут только в $1,11 \dots 1,02$ раза.

С целью повышения коэффициента мощности электрической тяги переменного тока в СТЭ и ЭПС применяют различные технические решения [1-9]. В частности, на ЭПС используют компенсаторы реактивной мощности, более совершенные управляемые полупроводниковые преобразователи и алгоритмы работы их систем управления [9], в том числе четырехквadrантные преобразователи, позволяющие повысить коэффициент мощности практически до 1,0 [5].

Таким образом, при прочих равных условиях, то есть при неизменных параметрах поездов и ЭПС, реализуемой ими активной мощности и других условиях, сокращение потребления реактивной мощности способствует повышению коэффициента мощности, снижению потерь в СТЭ и в целом повышению энергетической эффективности электрической тяги переменного тока.

Список литературы

1. Тихменев, Б. Н. Электровозы переменного тока со статическими преобразователями / Б. Н. Тихменев. – Москва : Трансжелдориздат, 1958. – 267 с. – Текст : непосредственный.
2. Тихменев, Б. Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования, электрические схемы и аппараты / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – Москва : Транспорт, 1980. – 471 с. – Текст : непосредственный.
3. Плакс, А. В. Системы управления электрическим подвижным составом / А. В. Плакс. – Москва : Маршрут, 2005. – 360 с. – Текст : непосредственный.
4. Надежность и эффективность электровозов ВЛ80Р в эксплуатации / Л. Д. Капустин, А. С. Копанев, А. Л. Лозановский. – под ред. Л. Д. Капустина. – Москва : Транспорт, 1986. – 240 с. – Текст : непосредственный.

5. Тихменев, Б. Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б. Н. Тихменев, В. А. Кучумов. – Москва : Транспорт, 1988. – 311 с. – Текст : непосредственный.

6. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт, 1982. – 528 с. – Текст : непосредственный.

7. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.1. / под. ред. К. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт, 1980. – 256 с. – Текст: непосредственный.

8. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.2. / под. ред. К. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт, 1981. – 292 с. – Текст: непосредственный.

9. Новый выпрямительно-инверторный преобразователь для тягового подвижного состава переменного тока с повышенными энергетическими характеристиками в режиме тяги / Д. А. Яговкин, О. В. Мельниченко [и др.] // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 3. – С. 46-51.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бакланов Александр Алексеевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент
кафедры «Подвижной состав
электрических железных дорог» ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-34-19.
E-mail: aleksbakl@mail.ru

Есин Николай Васильевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент
кафедры «Подвижной состав
электрических железных дорог» ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-34-19.
E-mail: nikve@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Baklanov Alexandr Alexeevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Cand. Eng. Sci., Associate Professor
of the department «Rolling stock of
electric Railways» OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-34-19.
E-mail: aleksbakl@mail.ru.

Esin Nikolaj Vasilevich Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Cand. Eng. Sci., Associate Professor
of the department «Rolling stock of
electric Railways» OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-34-19.
E-mail: nikve@mail.ru.

Шиляков Андрей Петрович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент
кафедры «Подвижной состав
электрических железных дорог» ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-34-19.
E-mail: doc135@mail.ru.
УДК 629.42:629.4.054, 625.28

Shilyakov Andrey Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Cand. Eng. Sci., Associate Professor
of the department «Rolling stock
of electric Railways» OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-34-19.
E-mail: doc135@mail.ru.

О. С. Абляимов

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

НОРМИРОВАНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА НА ПЕРЕВОЗОЧНУЮ РАБОТУ ЛОКОМОТИВОВ ДИЗЕЛЬНОЙ ТЯГИ

Предложены рекомендации для практического нормирования расхода энергии на тягу поездов в виде таблиц нормирования обобщённого типа и по вариантам работы, в которых дифференцируемость норм отражает возможности влияния всех основных факторов материально – технической базы и организации работы по поездкам, а также температурные условия. Процесс нормирования по таким таблицам заключается в отыскании соответствующих слагаемых при расчленении указанного расхода на отдельные составляющие перевозочной работы локомотивов и их сложении, что позволяет обходиться обычными простыми суммирующими устройствами, затрачивая на нормирование маршрутов машиниста минимальное время.

Ключевые слова: исследование, результат, грузовой поезд, тепловоз, эксплуатация, расход топлива, нормирование, перевозочная работа.

Oleg S. Ablyalimov

Tashkent state transport university (TSTU), Tashkent, the Republik of Uzbekistan

RATIONING OF FUEL CONSUMPTION FOR TRANSPORTATION WORKING OF LOCOMOTIVES OF DIESEL TRACTION

Recommendations are proposed for practical regulation of energy consumption for traction of trains in the form of tables of standardization of a generalized type and according to variants of work,

in which the differentiability of the norms reflects the possibilities of the influence of all the main factors of the material and technical base and the organization of work on trips, as well as temperature conditions. The process of rationing according to such tables consists in finding the corresponding terms when dividing the specified consumption into separate components of the transportation work of locomotives and adding them, which makes it possible to get by with ordinary simple summing devices, spending the minimum time on rationing the locomotive driver's routes.

Keywords: investigation, result, the freight train, the diesel locomotive, exploitation, fuel consumption, rationing, transportation work.

На кафедре «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ТГТУ проводятся исследования по обоснованию эффективности использования тепловозного парка локомотивов Узбекской железной дороги, некоторые из которых обозначены в работах [1,2 и другие].

Данное исследование является продолжением работы [3], цель которого заключается в практической реализации технического нормирования расхода энергии на перевозочную работу локомотивов дизельной тяги в различных условиях организации грузовых железнодорожных перевозок на разных по трудности участках узбекских железных дорог.

Для реализации сказанного предложены таблицы нормирования (см. таблицу 1 и таблицу 2) расхода натурального дизельного топлива на тягу поездов локомотивами дизельной тяги (тепловозы 2ТЭ10Л) на некоторых участках Среднеазиатской железной дороги.

Следует отметить, что практика использования указанных таблиц нормирования в ряде депо локомотивного комплекса свидетельствует об удобстве и простоте расчётов норм расхода дизельного топлива по данным маршрутов машиниста.

Для подсчёта расхода энергии за период движения локомотива с поездом для того или иного варианта работы ВР предлагаются следующие выражения, учитывающие расход энергии за период движения поезда и интегральные зависимости, аналитические выражения которых находятся при рассмотрении закономерностей преобразования энергии перевозочного процесса с использованием соответствующих характеристик оптимального режима управления [4]:

- грузовые поезда

$$E_x = E_Q + E_m + E_t + E_z \quad (1)$$

- пассажирские

$$E_x = E_Q^n + E_t^n + E_z^n \quad (2)$$

где E_x – расход энергии за период движения поезда в пути следования, который складывается из расхода энергии, соответственно, на создание механической касательной работы локомотива и на служебные нужды за весь период движения поезда, кг (кВт ч);

E_Q – составляющая расхода энергии при расчётных значениях t_p и z_p , зависящая от веса (массы) состава, работы по передвижению локомотива на участке, расходов на служебные нужды и средних затрат на торможения, а поправкой их на отклонение фактического веса (массы) от среднего его значения данного варианта работы ВР, кг (кВт ч);

E_m – составляющая расхода при расчётных значениях t_p и z_p , зависящая от числа осей и изменения расхода на торможения при отклонении фактического числа осей от средней из величины для данного варианта работы ВР, кг (кВт ч);

E_t и E_t^n – расходы, учитывающие отклонения фактического времени хода данного поезда от принятого расчётного его значения, кг (кВт ч);

E_z и E_z^n – расходы учитывающие отклонения фактического числа остановок от принятого расчётного их значения, кг (кВт ч);

E_Q^n – составляющая расхода пассажирских поездов, включающих пояснения для величин E_Q и E_m .

Развёрнутые выражения слагаемых расхода энергии E_x за период движения поезда положены в основу алгоритма расчёта на ЭВМ [5] таблиц нормирования обобщённого вида (см. таблицу 1).

Процесс нормирования по таким таблицам заключается в отыскании соответствующих слагаемых E_Q , E_m , E_t , E_z , E_c и сложения их, что позволяет обходиться обычными простыми суммирующими устройствами, затрачивая на нормирование маршрутов машиниста минимальное время.

В соответствии с обозначенными выше аналитическими выражениями, зависящими от двух координат сразу, был также, разработан алгоритм расчёта и составлены таблицы нормирования по вариантам работы ВР (см. таблицу 2).

К таблицам нормирования в ряде случаев удобно иметь некоторые поправочные коэффициенты, что позволит без переделки таблиц расширить возможности их использования. Так как таблицы рассчитываются по каждому варианту для определённой серии локомотива, то при смене на основной серии дополнительно можно использовать поправочные коэффициенты, которые находят для участков по данным расчётов на ЭВМ.

Таблица 1

Данные для расчёта дифференцированных норм расхода топлива тепловозами 2ТЭ10Л для депо Ташкент, грузовые поезда $E = (E_Q + E_m + E_t) \cdot K_t + E_z + E_c + E_o$

ΔE_z кг/ост.	Вес состава Q, t	Участки направления				Примечание	
		Узбекистан – Джизак $L = 171,3$ км	Джизак – Узбекистан $L = 171,3$ км	Узбекистан – Хаваст $L = 126,4$ км	Хаваст – Узбекистан $L = 126,4$ км		
1	2	3	4	5	6	7	
Значения E_Q , кг							
6,0	400-500	282	288	235	219	$E_z=z \cdot \Delta_z$ $E_c=g_x \cdot t_c$ $g_x=0,76$ кг/мин $E_o=12$ кг, по опыту работы	
7,0	501-600	297	392	243	225		
9,0	601-700	313	316	251	231		
–	–	–	–	–	–		
–	–	–	–	–	–		
19,0	3201- 3300	685	685	467	395		
20,0	3301- 3400	700	697	475	402		
21,0	3401- 3500	726	725	491	416		
Значение E_m , кг						Значения κ_t при средней температуре t_θ воздуха	
	Число осей					$t_\theta, ^\circ C$	κ_t
	20-31	60	30	180	40	-20	1,089
	31-40	80	60	205	70	-15	1,076
	–	–	–	–	–	-10	1,064
	–	–	–	–	–	-5	1,051
	221-230	595	553	505	568	0	1,038
	231-240	621	578	527	593	5	1,025
Значение E_t , кг						10	1,012
	Время движения $t, ч$					20	1,012
	1,81-1,90	20	22	12	14	20	0,985
	1,91-2,00	0	0	6	8	25	0,972
	2,01-2,10	-16	-15	00	00	30	0,959
	2,11-2,20	-34	-32	-15	-17		
	и т.д.	–	–	–	–		

Таблица 2

Дифференцированные нормы расхода дизельного топлива тепловозами
2ТЭ10Л на участке А-Т/Т-А (числитель – поездка от станции депо,
знаменатель – к станции депо), при $K_t = 1,0$

E_z , кг/ост	$Q_1 - Q_2$, т.		$m_1 - m_2$, осей							
			22-28	30-36	38-44	46-50	- " -	262-268	- " -	270-276
5/6	501-600		$\frac{332}{339}$	$\frac{348}{354}$	$\frac{363}{369}$	$\frac{378}{384}$				
20/22	601-700		$\frac{338}{344}$	$\frac{364}{362}$	$\frac{368}{377}$	$\frac{385}{392}$				
	3801-3900 -							$\frac{996}{1021}$		$\frac{1011}{1036}$
	3901-400 -							$\frac{1004}{1029}$		$\frac{1019}{1044}$
t , ч	2,51-2,60	2,61-2,70	2,71-2,80	2,81-2,90	2,91-3,00	3,01-3,10	3,11-3,20	3,21-3,30	3,31-3,40	3,41+3,50
E_t , кг	$\frac{38}{481}$	$\frac{12}{32}$	$\frac{00}{15}$	$\frac{-14}{00}$	$\frac{-24}{-12}$	$\frac{-31}{-18}$	$\frac{-39}{-24}$	$\frac{-43}{-32}$	$\frac{-45}{-38}$	$\frac{-46}{-42}$
t_c , ч	До 0,1	0,11-0,20	0,21-0,30	-0,31-0,40	0,41-0,50	0,51-0,60	0,61-0,70	0,71-0,80	0,81-0,90	0,91-1,00
E_c , кг	3	7	11	16	20	25	29	34	39	43

Такого же рода поправки можно внести на разный процент вагонов с кондиционированием воздуха в пассажирских поездах, для учёта влияния средних температурных условий на норму расхода энергии и так далее.

Таким образом, на основе разработанной методике нормирования расхода энергии на перевозочную работу локомотивов предложены для практического использования таблицы нормирования двух типов - обобщённого вида и по вариантам работы, позволяющие получать достаточно точные оптимальные дифференцированные нормы указанного расхода энергии при минимальных затратах времени на процесс подсчёта таких норм по данным маршрутов машиниста.

Список литературы

1. Абляимов, О. С. К использованию тепловозов 3ТЭ10М на участке Мароканд – Каттакурган Узбекской железной дороги / О. С. Абляимов. – Текст : непосредственный // Транспорт России: проблемы и перспективы : международная научно-практическая конференция / Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук. – Санкт - Петербург, 2018. – С. 111-115.
2. Абляимов, О. С. К анализу перевозочной работы тепловозов UzTE16M3 на участке Каттакурган – Навои Узбекской железной дороги / О. С. Абляимов. – Текст : непосредственный // Транспорт России: проблемы и перспективы : международная научно-практическая конференция / Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук. – Санкт - Петербург, 2019. – С. 120-124.
3. Толкачёв, А. В. Расчёты норм расхода энергии на перевозочную работу локомотивов методом расчленения / А. В. Толкачёв. – Текст : непосредственный // Тр. ТашИИТ. – 1973. – Выпуск 100. – С. 43-54.
4. Абляимов, О. С. Исследование возможностей снижения расхода топлива тепловозами на тягу поездов за счёт оптимальных режимов вождения поездов на САЗ ж. д. / А. В. Толкачёв, О. С. Абляимов // Научно - технический отчёт ТашИИТ, ВНИТЦ № 79028894, инв. № Б836191 / Ташкентский ин-т. инж. ж-д трансп. – Москва, 1979. – 67 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Абляимов Олег Сергеевич

Ташкентский государственный
транспортный университет (ТГТУ).
ул. Элтузар, д. 25, г. Ташкент, 100167,
Республика Узбекистан.
Кандидат технических наук, старший
научный сотрудник, и.о. профессора
кафедры «Локомотивы и локомотивное
хозяйство» ТГТУ.
Тел. +998371-254-52-16.
E-mail: o.ablyalimov@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ablyalimov Oleg Sergeyevich

Tashkent state transport university (TSTU).
25, Eltuzar str., Tashkent, 100167,
the Republik of Uzbekistan.
Doctor of philosophy, chief scientific worker,
acting professor of the chair «Locomotives
and locomotive, economy» TSTU.
Phone: +998371-254-52-16.
E-mail: o.ablyalimov@gmail.com.

Е. А. Третьяков

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

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ НА БАЗЕ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

В статье представлены результаты оценки технического эффекта по основным направлениям реализации интеллектуальной энергетической инфраструктуры стационарных потребителей железных дорог. Выполнено имитационное моделирование технических решений в области информационно-управляющих систем координированного управления напряжением, потоками мощности, реконфигурацией, восстановлением нормального режима в электрических сетях стационарных потребителей железных дорог на основе мультиагентного подхода применительно к реальному участку электроснабжения.

Результаты исследований показали техническую эффективность представленных алгоритмов информационно-управляющих систем координированного управления напряжением, потоками мощности, реконфигурацией, восстановлением нормального режима в электрических сетях стационарных потребителей железных дорог. Ожидаемое расчетное повышение надежности электроснабжения (сокращение отказов технических средств, среднее число отключений) составляет 7 %, снижение потерь мощности – 23 %, повышение пропускной способности – до 41 %, сокращение затрат на содержание энергетической инфраструктуры – 12 %.

Ключевые слова: эффективность, интеллектуальная энергетическая инфраструктура, электроснабжение, стационарные потребители, моделирование.

Evgeny A. Tretyakov

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

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF IMPLEMENTING INTELLECTUAL ENERGY INFRASTRUCTURE OF RAILWAYS BASED ON DIGITAL SUBSTATIONS

The article presents the results of assessing the technical effect in the main directions of the implementation of the intelligent energy infrastructure of stationary consumers of railways. Simulation modeling of technical solutions in the field of information and control systems for

coordinated control of voltage, power flows, reconfiguration, restoration of normal mode in electrical networks of stationary railroad consumers was carried out on the basis of a multi-agent approach applied to a real section of power supply.

The research results have shown the technical efficiency of the presented algorithms of information and control systems for coordinated control of voltage, power flows, reconfiguration, restoration of normal mode in the electric networks of stationary railway consumers. The expected calculated increase in the reliability of power supply (reduction in hardware failures, the average number of outages) is 7%, a decrease in power losses – 23%, an increase in throughput - up to 41%, a reduction in the cost of maintaining energy infrastructure – 12%.

Keywords: efficiency, smart energy infrastructure, power supply, stationary consumers, modeling.

Введение

Электросетевой комплекс холдинга «РЖД» является крупнейшим в России в части оказания услуг по передаче электроэнергии по электрическим сетям стационарным потребителям.

В соответствии со стратегией научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года, с приоритетными направлениями Национальной технологической инициативы EnergyNet разработка принципов, методов и механизмов формирования интегрированных интеллектуальных энергетических систем с различными типами средств централизованного, местного регулирования и активными потребителями является весьма актуальной задачей [1].

В настоящее время продолжается внедрение цифровых тяговых подстанций на сети железных дорог, что позволяет реализовать технологии управления Smart Grid, диагностику состояния оборудования. Аналогично начинается постепенный переход к электрической сети нового технологического уклада с качественно новыми характеристиками надежности, эффективности, доступности, управляемости и клиентоориентированности электроэнергетической инфраструктуры.

Под электрической сетью нового технологического уклада понимается электроэнергетическая система, характеризующаяся среди прочего следующими технологиями [2]:

– многоагентные интеллектуальные системы управления для создания адаптивных самовосстанавливающихся систем электроснабжения железных дорог;

– системы управления, основанных на знаниях (экспертные системы).

Под эффективностью внедрения интеллектуальной энергетической инфраструктуры железных дорог при электроснабжении стационарных потребителей будем в дальнейшем понимать технический эффект в натуральных показателях без рассмотрения капитальных затрат и экономических показателей внедрения указанных технологий, что является предметом прочих исследований авторов.

Несмотря на то, что научные исследования в области интеллектуальных электроэнергетических систем весьма обширны [3-4], на железнодорожном транспорте они имеют значительный потенциал развития: особенно в части информационно-управляющих систем, технологического управления и диагностики состояния электрооборудования в рамках концепций «Цифровая тяговая подстанция», «Цифровая железная дорога».

Методология исследования.

Основой создания интеллектуальной системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог с учетом перспективных требований при развитии технологий Smart Grid может служить метод на базе мультиагентного подхода, включающего в себя архитектуру с распределенными центрами принятия решений – управляющими контроллерами, которые содержат средства прогнозирования изменений параметров режима и средства самоорганизации на основе оперативной оценки результатов управления и разделены по функциональному назначению с изменяемой зоной ответственности.

В качестве управляющих систем в пределах участка электрической сети с питающей подстанцией могут выступать программно-технические комплексы (ПТК), а в качестве самоорганизующихся контроллеров – интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ) на базе промышленных компьютеров.

Рассмотрим результаты имитационного моделирования ряда разработанных технических решений в области информационно-управляющих комплексов на основе мультиагентного подхода применительно к реальному участку электроснабжения стационарных потребителей железных дорог [5]. Моделирование выполнено в программном комплексе, имитирующем ПТК интеллектуальной системы автоматического управления транспортом и распределением электрической энергии в системе электроснабжения

стационарных потребителей железных дорог, обеспечивающий следующие основные функции:

- автоматическое поддержание оптимальных (квазиоптимальных) уровней напряжения в контролируемой зоне электрической сети с учетом влияния тяговой нагрузки;
- автоматическое координированное интеллектуальное управление распределенными средствами регулирования напряжения и средствами компенсации реактивной мощности, устройствами FACTS, накопителями, генерацией, спросом активных потребителей для стабилизации напряжения, исключения перегрузки (повышение пропускной способности) энергообъектов электрической сети, снижения потерь электроэнергии и затрат на нее;
- автоматическая реконфигурация электрической сети для оптимизации или восстановления нормального режима.

Архитектура связей ПТК для питающей подстанции и контролируемого участка электрической сети включает в себя автоматизированное место (АРМ) с серверами, коммутаторами, контроллерами связи и управления, коммутаторы сети, интеллектуальные электронные устройства (подстанционный уровень), интеллектуальные электронные устройства (уровень присоединения), объекты управления, устройства сопряжения с измерительными устройствами (полевой уровень).

Имитационное моделирование выполнялось на основе математической (цифровой) модели электрической сети 10/0,4 кВ сторонних потребителей дистанции электроснабжения в разработанном программном обеспечении [6] в соответствии со структурной схемой работы ИЭУ подстанционного уровня с имитацией обратной связи (рисунок 1). Отличительной особенностью указанного ПТК является применение алгоритмов самоорганизации, экспертных систем при координированном управлении распределенными энергообъектами в реальном времени.

В качестве исходных данных расчета задавалась схема замещения системы электроснабжения из 16 линий (ветвей), значения параметров пассивных элементов, а также значения параметров режима активных элементов, определяемые реальными условиями работы источников и потребителей электроэнергии. Нагрузки задавались статическими характеристиками по напряжению. Локальные агенты задавались тремя

состояниями: измерение (Metering), ожидание работы (Waiting), работа (Control). Управляющий контроллер осуществляет координацию работы локальных с учетом прогноза, производственных правил и ограничений по напряжению, предельной мощности и пр. При этом определение величины управляющих воздействий осуществляется в виде приращений активной и реактивной мощности на основе линеаризованных уравнений в полярных координатах через матрицу Якоби на основе координации разнотипных линейных регуляторов напряжения и мощности с учетом технических возможностей их работы (плавное, ступенчатое регулирование и пр.) и влиянии внешней системы электроснабжения.

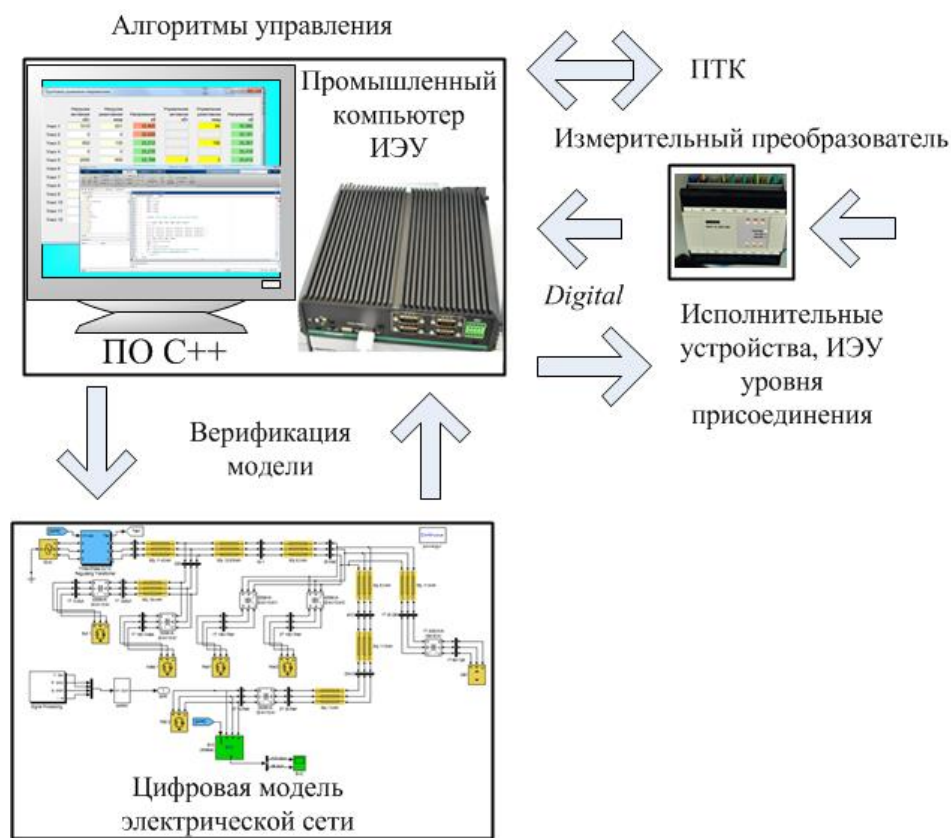


Рисунок 1 – Структурная схема работы ИЭУ подстанционного уровня

На рисунке 2 представлено снижение падения напряжений в линиях и потерь мощности в них относительно локального регулирования за счет автоматического координированного интеллектуального управления распределенными средствами регулирования напряжения и перетоков мощности (устройства компенсации реактивной мощности на шинах 6 и 7, генерации на шине 3 и накопления на шине 4).

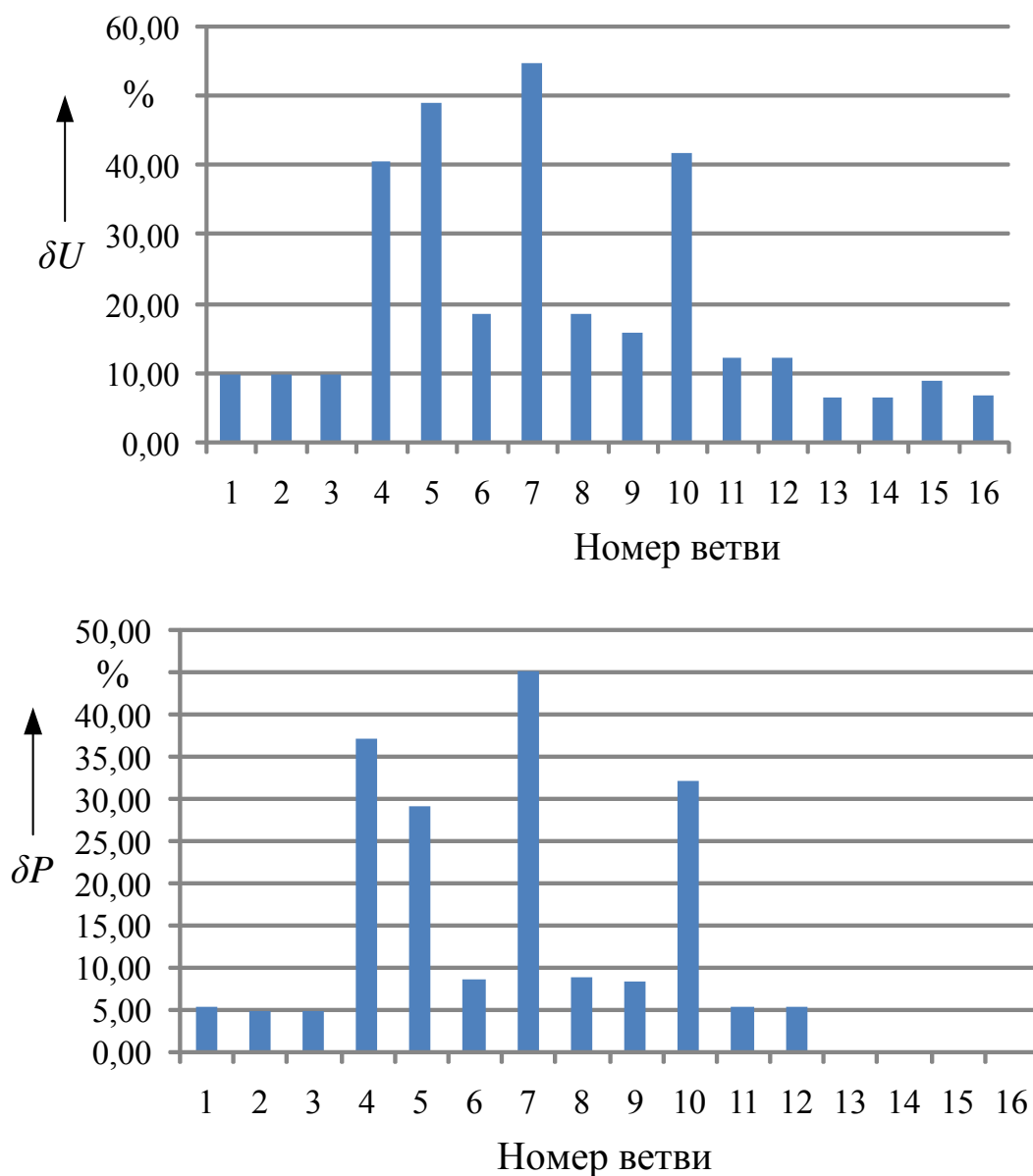


Рисунок 2 – Снижение падения напряжения в линиях и потерь мощности в них

Для снижения перегрузки, повышения пропускной способности реализован перспективный подход к реконфигурации системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог (рисунок 3) на основе решения задач оптимизации нормальных режимов (статическая реконфигурация) и минимизации потребления электроэнергии без расчета установившихся режимов в темпе процессов изменения спроса на электроэнергию (динамическая реконфигурация).

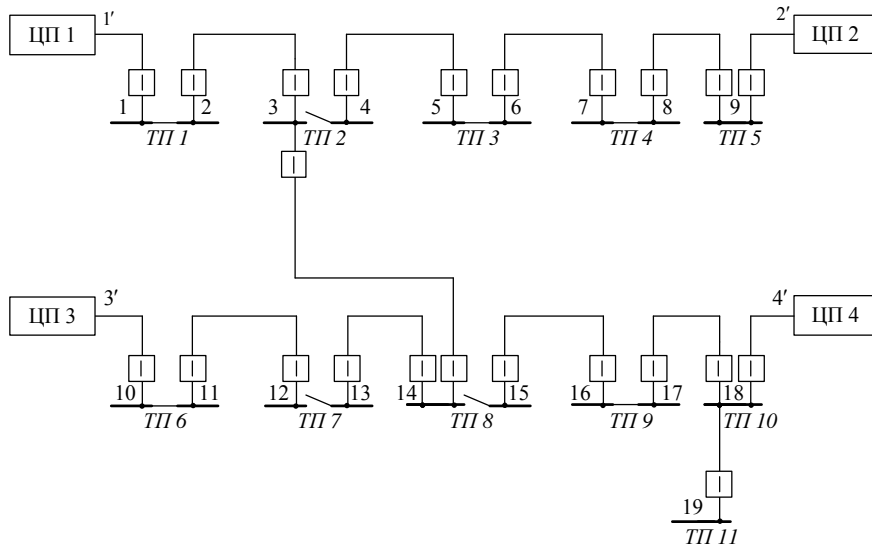


Рисунок 3 – Расчетная электрическая схема

Оптимизационная задача динамической реконфигурации имеет вид:

$$\sum_{k=1}^N P_k(\delta_{ij}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\delta_{ij}=0,1 \quad (i,j) \in E$$

при ограничениях:

$$\sum_{\substack{j \in N_1 \\ j \in N_3}} P_{ij} - \sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \in N_4}} P_{ji} \begin{cases} \leq P_i^{\text{ист}}, i \in N_{1'}, N_{2'}, N_{3'}, N_{4'}; \\ \leq -(P_{\text{н}j} - P_{\text{г}j}), j \in N_{\text{н}}; \end{cases}$$

$$\sum_{i=j} P_j^{\text{ист}} > \sum_{i=j} (P_{\text{н}j} - P_{\text{г}j}), \Delta P_{ij} = 0; 0 \leq P_{ij} < P_{ij}^{\text{max}}; 0 \leq Q_{ij} < Q_{ij}^{\text{max}}; \quad (2)$$

$$U_j^{\min} \leq U_j < U_j^{\max}; \sum_{i \neq j} \delta_{ij} = a, a = 1, \dots, n.$$

Модель потоков мощности для радиальной электрической сети может быть представлена в виде:

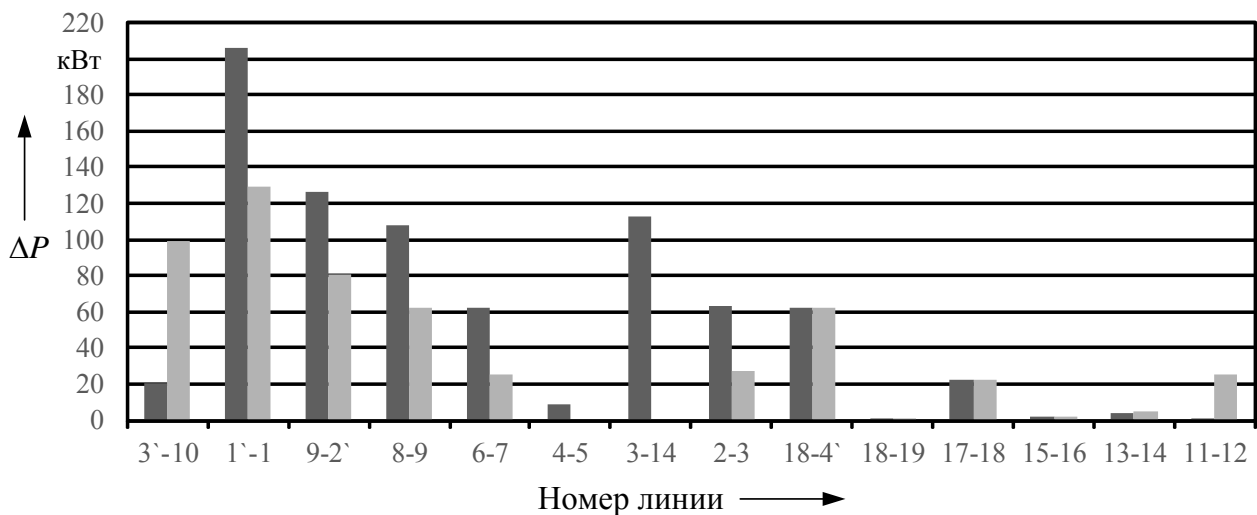
$$P = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N(i)} \delta_{ij} (P_{\text{н}j} - P_{\text{г}j}) + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N(i)} \delta_{ij} (\Delta P_{ij}); \quad (3)$$

$$Q = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N(i)} \delta_{ij} (Q_{\text{н}j} - Q_{\text{г}j}) + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N(i)} \delta_{ij} (\Delta Q_{ij}),$$

где $P_{\text{н}j}, P_{\text{г}j}$ и $Q_{\text{н}j}, Q_{\text{г}j}$ – активные и реактивные мощности нагрузки и инъекции (от источников энергии) на шине j ; $\Delta P_{ij}, \Delta Q_{ij}$ – потери активной и

реактивной мощности в линиях ij ; P_{ij}, Q_{ij} – перетоки активной и реактивной мощности в линиях ij ; r_{ij}, x_{ij} – активные и индуктивные сопротивления линий ij ; δ_{ij} – двоичная переменная ($\delta_{ij} = 0, 1 (i, j) \in E$).

На рисунке 4 представлены результаты реализации представленного подхода при динамической реконфигурации: исходное состояние – $\delta_{34} = \delta_{1213} = \delta_{1415} = 0$, после реконфигурации – $\delta_{45} = \delta_{314} = \delta_{1415} = 0$.



б

Рисунок 4 – Потери активной мощности (б) до (левый столбец) и после (правый) реконфигурации

В рамках самовосстанавливающихся систем электроснабжения стационарных потребителей железных дорог предложен подход на основе решения задачи целочисленного линейного программирования с минимальными потерями мощности без расчета установившихся режимов на основе агентного подхода с ограничением мощности нагрузок/активных потребителей.

В данном случае предлагается даже при отсутствии генерации, работающей параллельно с сетью, в качестве принципа работы автоматического включения резерва осуществлять подключение обесточенного участка к другому источнику, не нарушая баланс мощности на втором источнике, путем опережающего деления-реконфигурации схемы его питания.

На рисунке 5 представлены полученные результаты имитационного моделирования реализации представленного подхода для различных схем электроснабжения на примере напряжений для исходного, послеаварийного 1 и 2, восстановленного режима.

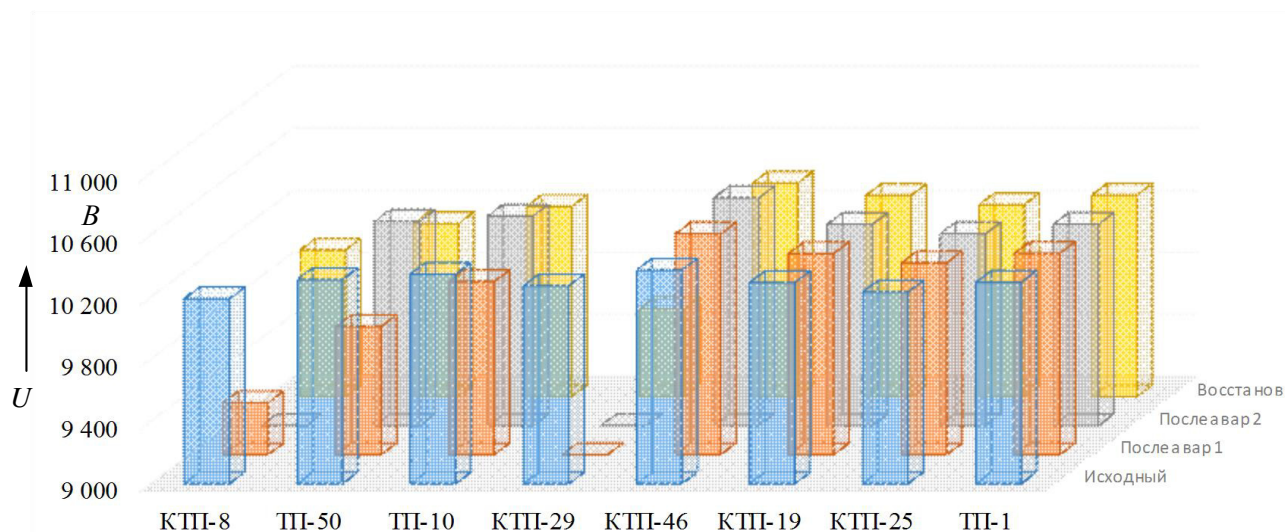


Рисунок 5 – Напряжения в узлах электрической схемы в различных режимах

Реализация интеллектуальной энергетической инфраструктуры железных дорог связана прежде всего с повышением наблюдаемости, управляемости, автоматизации и диагностики энергообъектов, развитием информационно-управляющих систем, цифровизации бизнес-процессов при передаче и распределении электроэнергии [7].

Технические эффекты от внедрения интеллектуальной энергетической инфраструктуры железных дорог при электроснабжении стационарных потребителей на основе расчетов по ряду представленных выше подходов и результатов моделирования представлены в таблице 1.

Полученные результаты имитационного моделирования позволили для расчетного участка электрической сети дистанции электроснабжения определить значения технического эффекта по снижению потерь мощности, повышению качества электроэнергии (по медленному изменению напряжения), представленные в таблице 1.

Таблица 1

Технические эффекты и способы их достижения

Технический эффект	Способы достижения / технологические процессы	Эффект
1	2	3
Снижение потерь мощности (электроэнергии)	Автоматическое управление электросетевыми контроллерами (просьюмерми) электрической сети координированно с генерацией/потреблением активной и реактивной мощности, работой линейных регуляторов параметров режима.	23 %
Повышение качества электроэнергии (по напряжению)	Реконфигурация электрической сети в автоматическом режиме	14 %
Повышение пропускной способности		41 %
Повышение надежности электроснабжения	Снижение средней суммарной длительности устойчивых отключений на одного потребителя в год (SAIDI). Снижение средней частоты устойчивых отключений на одного потребителя в год (SAIFI). Сокращение поездо-часов задержек по вине хозяйства электроснабжения Сокращение отказов технических средств, времени ликвидации технологических нарушений (аварий). Обеспечение автоматического восстановления нормального режима.	7 % (оценка)
Сокращение затрат на содержание энергетической инфраструктуры	Существенное снижение CAPEX и OPEX за счет сбора данных от удаленных объектов и устройств в электрической сети, автоматизированной обработки массивов данных анализа неисправностей, планирования и контроля ТО и ТР и прочего в рамках задач онлайн и офлайн систем поддержки принятия решений на основе разработанных математических алгоритмов. Повышение производительности труда (снижение трудозатрат на обслуживание условной единицы оборудования)	до 20 % (оценка)

Оценка технических эффектов, связанных с повышением надежности электроснабжения и сокращением затрат на содержание энергетической инфраструктуры, выполнена в соответствии с действующими методиками ОАО «РЖД», СТО и инструкциями [8-9], принимая удельный ущерб 99 руб./кВт·ч в ценах 2018 г. (таблица 3 СТО 56947007-29.240.01.271-219) от недоотпуска электроэнергии в объеме 2,3 %.

В качестве измерителя при оценке сокращения затрат на содержание

энергетической инфраструктуры принималось [10]: протяженность воздушных и кабельных линий электропередач, количество подстанций, объем отпуска электроэнергии в сеть по уровням напряжений, уровень фактических потерь электроэнергии.

Уровень капитальных затрат для модернизации системы электроснабжения железных дорог, необходимый для перехода к автоматическому распределенному управлению в реальном времени на основе самоорганизующихся интеллектуальных распределенных систем накопления, генерации, передачи и потребления электроэнергии (управление спросом) путем их оптимальной координации, зависит от уровня цифровизации и определяется сметной документацией.

Заключение

Результаты исследований показали техническую эффективность представленных алгоритмов информационно-управляющих систем координированного управления напряжением, потоками мощности, реконфигурацией, восстановлением нормального режима в электрических сетях стационарных потребителей железных дорог.

Ожидаемое повышение надежности электроснабжения (сокращение отказов технических средств, среднее число отключений) составляет 7 %, снижение потерь мощности – 23 %, повышение пропускной способности – до 41 %, сокращение затрат на содержание энергетической инфраструктуры – 12 %. Срок окупаемости по экспертным оценкам составит менее 6 лет при условии цифровизации тяговых и трансформаторных подстанций железных дорог.

Интеллектуальная энергетическая инфраструктура, основанная на адаптивном управлении режимами работы силового оборудования, в том числе устройствами регулирования напряжения, реактивной мощности, FACTS, накопителями, распределенной генерации, электроподвижного состава, позволит обеспечить достижение целевых показателей надежности, экономичности, пропускной способности системы электроснабжения железных дорог.

Список литературы

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года. «Белая книга». – Москва, 2015. – 63 с. – Текст : электронный // ОАО «РЖД» :

официальный сайт. – URL: http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf (дата обращения: 04.10.2020).

2. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. – Москва : Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы, 2012. – 51 с.

3. Morales, D. Optimal location of voltage regulators / D. Morales. – Text: direct // IEEE Trans. on Power Systems. – 2007. – Vol. 12. – PP. 27-29.

4. Крюков, А. В. Оперативное управление в системах электроснабжения железных дорог: монография / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин ; под ред. А. В. Крюкова. – Иркутск : ИрГУПС, 2012. – 129 с. – Текст : непосредственный.

5. Черемисин, В. Т. Совершенствование методов и средств управления транспортом и распределением электроэнергии в системах электроснабжения стационарных потребителей железных дорог : монография / В. Т. Черемисин, Е. А. Третьяков / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, – 2017. – 187 с. – Текст : непосредственный.

6. Групповое управление напряжением в электроэнергетических системах. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ : № 2019666735 : заявлено 05.12.2019 : опубликовано 13.12.2019. / В. Т. Черемисин, Е. А. Третьяков, А. А. Лаврухин / Омский гос. ун-т путей сообщения.

7. Cheremisin, V. Implementation of the method of adaptive management of electric power transmission in distribution electric networks of railways / V. Cheremisin, E. Tretyakov. –Text: direct // MATEC Web of Conferences. – 2018. – vol. 239, 01011. – DOI: 10.1051/matecconf/201823901011.

8. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте // Приложение к указанию МПС России от 31.08.1998 г. № в-1024у. – Москва : МПС, 1998.

9. СТО РЖД 08.005-2011. Инновационная деятельность в ОАО «РЖД». Порядок оценки эффективности инновационных проектов» // Стандарт ОАО «РЖД» : дата введения: 01.07.2012.

10. Методика расчета и подтверждения экономического эффекта от использования результатов научно-технических работ в деятельности ОАО «РЖД» по кругу ведения Департамента электрификации и электроснабжения : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 30.12.2008 №2889р.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Третьяков Евгений Александрович

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук,

доцент кафедры «Подвижной состав
электрических железных дорог» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tretyakov Evgeny Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian

Federation.

PhD in Physico-mathematical sciences,

Associate Professor of the department

«Rolling stock of electric railways » OSTU.

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

УДК 621.331:621.311

М. М. Никифоров

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

г. Омск, Российская Федерация

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА УЧАСТКАХ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД СОХРАНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

В статье рассмотрен вопрос уточнения структуры небаланса электроэнергии в системе тягового электроснабжения. Показано, что для более точного определения значения небаланса необходимо помимо известных коммерческой и технологической составляющих потерь определять расход электроэнергии по счетчикам тяговых подстанций, используемый для профилактического подогрева и плавки гололеда на проводах контактной сети, а также для обеспечения сохранного напряжения на законсервированных электрифицированных участках железных дорог. Предложена методика определения технологического расхода электроэнергии на законсервированных участках постоянного тока, находящихся под сохранным напряжением. Показано, что для аналогичных участков переменного тока дополнительно выделять расход электроэнергии на поддержание сохранного напряжения не требуется.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, контактная сеть, технологический расход электроэнергии, структура потерь, сохранное напряжение.

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE TECHNOLOGICAL CONSUMPTION OF ELECTRIC POWER IN THE AREAS LOCATED GUARD VOLTAGE

The article discusses the issue of clarifying the structure of the imbalance of electricity in the traction power supply system. It is shown that for a more accurate determination of the unbalance value, it is necessary, in addition to the known commercial and technological components of losses, to determine the power consumption by the meters of traction substations, which is used for preventive heating and melting of ice on the wires of the contact network, as well as to ensure the guard voltage on the conserved electrified sections of the railroads. A method is proposed for determining the technological consumption of electricity in conserved sections of direct current, which are under a guard voltage. It is shown that for similar sections of alternating current, it is not required to additionally allocate power consumption to maintain the guard voltage.

Keywords: traction power supply system, contact network, technological power consumption, loss structure, guard voltage.

Одним из ключевых показателей эффективности использования электроэнергии на тягу поездов в ОАО «Российские железные дороги» принят уровень небаланса электроэнергии в системе тягового электроснабжения [1], представляющий собой разницу между объемом электроэнергии, отпущенной в контактную сеть с тяговых подстанций, 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, и/или определенным расчетным путем по данным о мощности электроустановок потребителей и продолжительности использования этой мощности (далее – Небаланс). Известно, что небаланс включает в себя технологические и коммерческие потери [2]. Развернутая структура технологических потерь представлена в [3, 4], а коммерческих потерь – в [5].

Однако до последнего времени при определении структуры небаланса не учитывался технологический расход электроэнергии по счетчикам тяговых подстанций, используемый для профилактического подогрева и плавки гололеда на проводах контактной сети, а также для обеспечения сохранного напряжения на законсервированных электрифицированных участках железных дорог [6]. За счет этого искусственно увеличивалось значение коммерческой составляющей потерь электроэнергии на тягу поездов. При этом, если для определения расхода электроэнергии на профилактический подогрев и плавку гололеда разработаны и утверждены соответствующие инструктивно-методические документы, то оценка расхода электроэнергии для поддержания сохранного напряжения никак не регламентирована.

На сети электрифицированных железных дорог для малодеятельных и законсервированных участков общепринятым является подача напряжения в контактную сеть с целью обеспечения сохранности проводов контактной сети. Под малодеятельными участками понимаются электрифицированные участки железных дорог, движение поездов на которых осуществляется несколько часов в сутки.

Питание законсервированных участков обычно осуществляется по консольным схемам, чтобы исключить перетоки мощности по контактной сети. Схема питания законсервированного участка контактной сети постоянного тока приведена на рисунке 1.

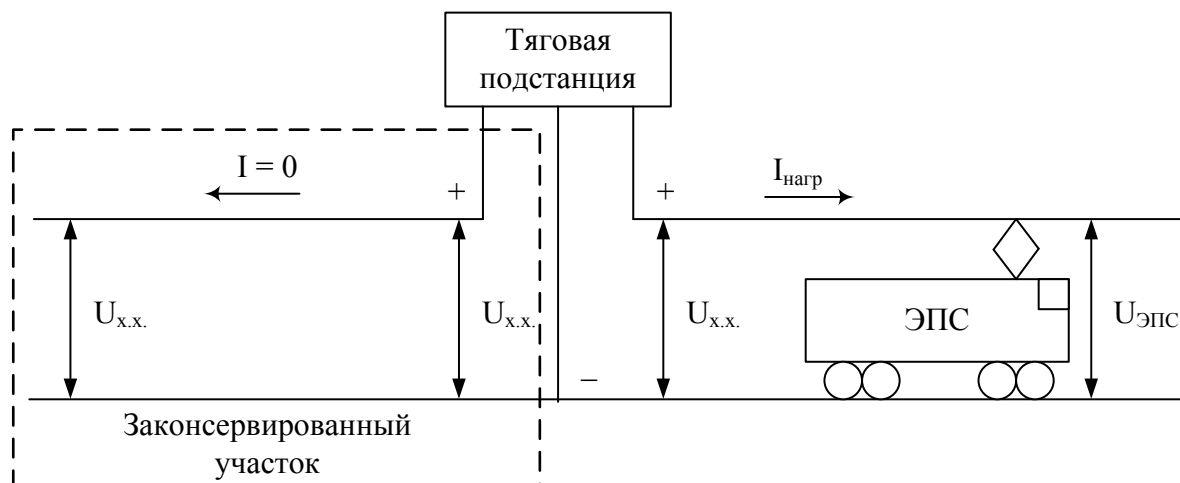


Рисунок 1 – Схема питания законсервированного участка, получающего питание по консольной схеме от тяговой подстанции, имеющей тяговую нагрузку

При этом в большинстве случаев тяговая подстанция, питающая законсервированный участок, одновременно осуществляет питание тяговой нагрузки по другим фидерам контактной сети.

На рисунке 1 применены следующие обозначения: $U_{х.х.}$ – напряжение холостого хода на шинах тяговой подстанции; $U_{эпс}$ – напряжение на токоприемнике электроподвижного состава; $I_{нагр.}$ – ток тяговой нагрузки.

Принципиальные схемы учета электроэнергии на тяговых подстанциях постоянного и переменного тока представлены на рисунке 2.

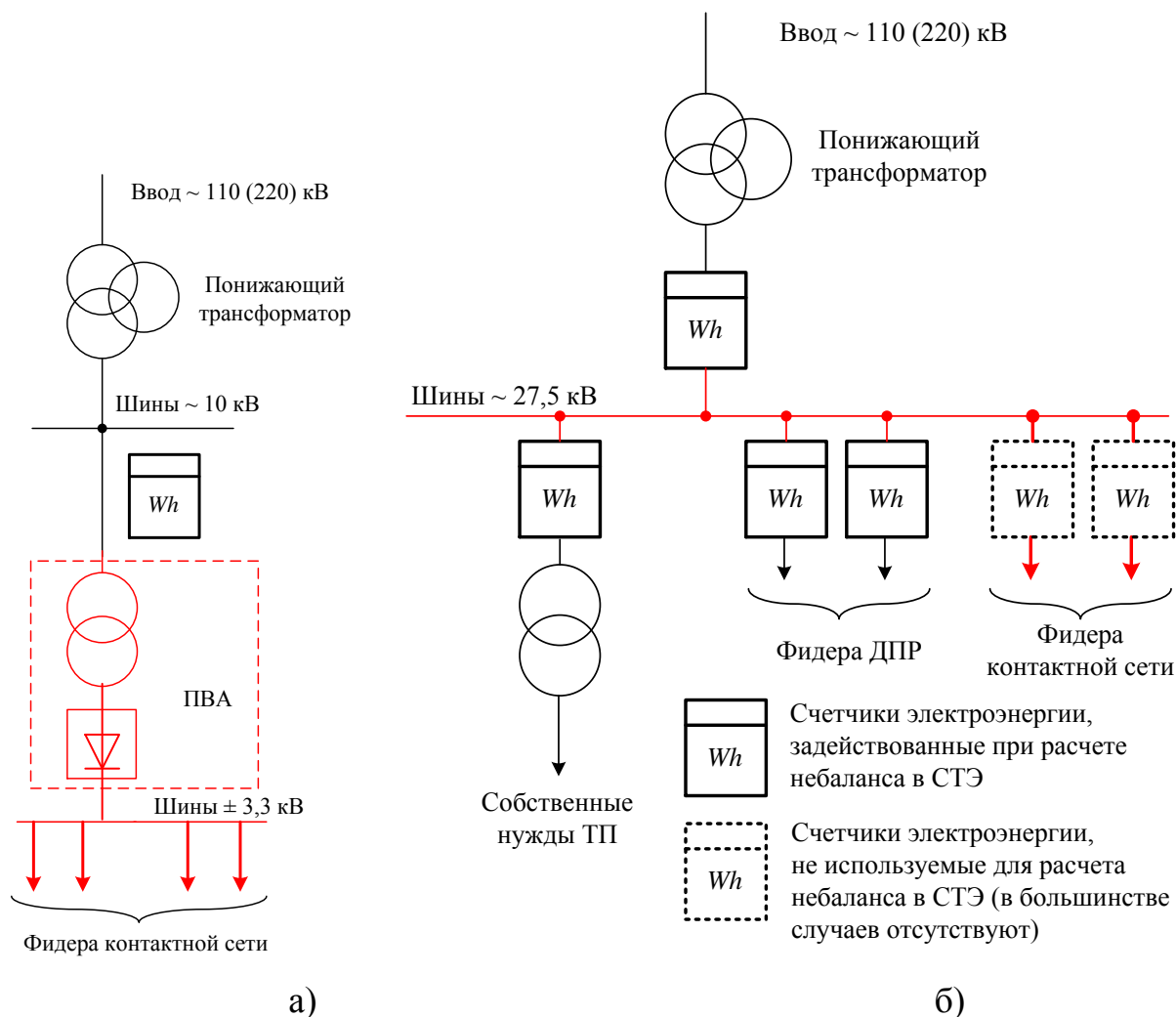


Рисунок 2 – Организация учета электроэнергии, поставляемой в контактную сеть от тяговых подстанций:

а) постоянного тока; б) переменного тока

Как видно из рисунка 2, а на подстанциях постоянного тока приборы учета электроэнергии на тягу поездов установлены на стороне переменного

тока. Вследствие этого, даже при полном отсутствии тяговой нагрузки эти приборы будут учитывать потери холостого хода в преобразовательно-выпрямительном агрегате:

$$W_{сч} = \Delta W_{х.х.}^{ПВЭ} . \quad (1)$$

Значение потерь холостого хода в преобразовательно-выпрямительном агрегате определяется его конструктивными характеристиками и может быть определено по паспортным данным за любой рассматриваемый промежуток времени:

$$\Delta W_{х.х.}^{ПВЭ} = \Delta P_{х.х.}^{ПВЭ} \cdot t , \quad (2)$$

где $\Delta P_{х.х.}^{ПВЭ}$ – паспортная мощность потерь холостого хода преобразовательно-выпрямительного агрегата, кВт (также может быть определена по данным АСКУЭ при отсутствии тяговой нагрузки по всей тяговой подстанции [7]);

t – период времени, за который планируется определять технологический расход электроэнергии на поддержание сохранного напряжения, ч.

В случае появления тяговой нагрузки на одном из фидеров контактной сети счетчик будет учитывать расход электроэнергии на тягу поездов $W_{тяг}$, а также потери холостого хода и короткого замыкания в преобразовательно-выпрямительном агрегате, кВт·ч:

$$W_{сч} = W_{тяг} + \Delta W_{к.з.}^{ПВЭ} + \Delta W_{х.х.}^{ПВЭ} , \quad (3)$$

где $\Delta W_{к.з.}^{ПВЭ}$ – потери короткого замыкания в преобразовательно-выпрямительном агрегате, обусловленные протеканием тока тяговой нагрузки (определяется по паспортным характеристикам преобразовательно-выпрямительного агрегата).

Учитывая, что на законсервированном участке ток в контактной сети отсутствует, отсутствуют и потери короткого замыкания при подаче сохранного напряжения. Тогда технологический расход электроэнергии на тяговой подстанции постоянного тока на поддержание сохранного напряжения для законсервированного участка может быть определен по формуле, кВт·ч:

$$W_{U\text{ сохр.}}^{конс.} = \frac{n_{конс.}}{n} \cdot \Delta W_{х.х.}^{ПВЭ} , \quad (4)$$

где n – общее количество фидеров контактной сети тяговой подстанции постоянного тока, питающей законсервированный участок (без учета обходной (ремонтной) ячейки);

$n_{\text{конс.}}$ – количество фидеров контактной сети тяговой подстанции постоянного тока, по которым сохранное напряжение подается на законсервированный участок.

В случае, когда необходимо определить технологический расход электроэнергии на поддержание сохранного напряжения на малодеятельном участке, существуют два альтернативных варианта его питания. В первом варианте, питание малодеятельного участка осуществляется также как и законсервированного по консольной схеме питания. В этом случае для определения технологического расхода электроэнергии на поддержание сохранного напряжения может быть использована следующая формула, кВт·ч:

$$W_{\text{У сохр.}}^{\text{малод.}} = \frac{n_{\text{малод.}}}{n} \cdot \frac{t_{\text{отс.}}}{24} \cdot \Delta W_{\text{х.х.}}^{\text{ПВЭ}}, \quad (5)$$

где $n_{\text{малод.}}$ – количество фидеров контактной сети тяговой подстанции постоянного тока, по которым сохранное напряжение подается на малодеятельный участок;

$t_{\text{отс.}}$ – количество часов гарантированного отсутствия тяговой нагрузки на малодеятельном участке в сутки, ч.

Во втором варианте, который встречается намного чаще, питание малодеятельного участка осуществляется по одному из вариантов двухсторонних схем от смежных тяговых подстанций для обеспечения снижения потерь электроэнергии на тягу поездов в целом по участку. В этом случае подача напряжения в контактную сеть в первую очередь обеспечивает повышение эффективности использования электроэнергии на тягу поездов и не должна рассматриваться как мероприятие по обеспечению сохранного напряжения.

Анализ схемы учета электроэнергии, приведенной на рисунке 2, б, показывает, что на тяговых подстанциях переменного тока потери холостого хода в понижающем трансформаторе определяются ранее, чем расход электроэнергии на тягу поездов. Таким образом, весь технологический расход электроэнергии по тяговой подстанции переменного тока, в том числе

связанный с подачей сохранного напряжения на законсервированных и малодеятельных участках, уже относится на нужды «Трансэнерго» – филиала ОАО «РЖД» и не требует разработки специальной методики для его определения.

Список литературы

1. Никифоров, М. М. Целевые показатели энергосбережения и повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения и электропотребления на нетяговые нужды // М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2010. – № 3 (3). – С. 110-116.
2. Хряков, А. А. Снижение коммерческой составляющей потерь электрической энергии на тягу поездов на полигоне постоянного тока / А. А. Хряков, М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2011. – № 1 (5). – С. 42-45.
3. Никифоров, М. М. Оценка технологических потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, А. В. Язов. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научно-практической конференции, посвященной Дню Российской науки / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – С. 40-45.
4. Каштанов, А. Л. Новые подходы к исследованию проблемы небаланса электроэнергии на тягу поездов / А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, С. Ю. Ушаков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 2 (30). – С. 77-87.
5. Cheremisin, V. T. Assessment of train traction electric energy losses / V. T. Cheremisin, M. M. Nikiforov, S. Y. Ushakov. – Text: direct // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon-2018. – Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. – 2205 p. – ISBN 9781728100623.
6. Никифоров, М. М. Совершенствование методики определения потерь электроэнергии на тягу поездов / М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 1 (41). – С. 98-107.
7. Никифоров, М. М. Экспериментальная оценка потерь электроэнергии в преобразовательных агрегатах тяговых подстанций постоянного тока за счет применения АСУЭ ФКС / М. М. Никифоров, Ю. В. Плотников. – Текст :

непосредственный // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы второй всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 234-241.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Никифоров Михаил Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д.35, г. Омск, 644041,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заместитель директора Научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте Омского государственного университета путей сообщения.

Тел.: (381-2) 44-39-23

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Nikiforov Mikhail Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., 35, Omsk, 644041,

the Russian Federation.

Cand.Tech.Sci, deputy director, Research Institute for Energy Efficiency in Railway Transport, Omsk State Transport University.

Phone: (381-2) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

УДК 621.331

А. С. Вильгельм

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

г. Омск, Российская Федерация

ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯГИ ПОЕЗДОВ

В статье обосновывается целесообразность применения интеллектуальных технологий в вопросах планирования энергоэффективности тяги поездов. Описаны существующие и применяемые в ОАО «РЖД» подходы в нормировании и планировании уровня энергопотребления и отмечены их недостатки. Предложена архитектура системы, основанной на интеллектуальной технологии определения оптимального сочетания параметров и характеристик системы тягового электроснабжения, организации движения поездов и системы управления тяговыми ресурсами и предназначенной для поддержки принятия управленческих решений и планирования изменений в работе участков железных дорог с целью повышения их энергоэффективности при безусловном достижении перспективных эксплуатационных показателей и показателей перевозочного процесса.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, энергоёмкость, система тягового электроснабжения, интеллектуальные системы, тяговые ресурсы, перевозочный процесс.

Alexander S. Vilgelm

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

APPROACHES TO THE CREATION OF INTELLECTUAL TECHNOLOGY FOR PLANNING THE TRACTION OF TRAINS ENERGY EFFICIENCY

The article substantiates the feasibility of using intelligent technologies in planning the energy efficiency of train traction. The current and applied in Russian Railways approaches to the regulation and planning of the energy consumption level are described and their shortcomings are noted. The architecture of the system based on intelligent technology for determining the optimal combination of parameters and characteristics of the traction power supply system, the organization of train traffic and the traction resource management system and designed to support the adoption of managerial decisions and planning changes in the operation of railway sections in order to increase their energy efficiency with the unconditional achievement of promising performance indicators and indicators of the transportation process.

Keywords: energy efficiency, energy intensity, traction power supply system, intelligent systems, traction resources, transportation process.

Порядка 10 % из общих расходов компании ОАО «РЖД» приходится на электроэнергию. При этом по итогам 2019 году более 155 млрд рублей составили расходы на приобретение электроэнергии на тягу поездов. Рост этих расходов за последние 5 лет составлял в среднем 8,0 % в год. В связи с этим по-прежнему сохраняется актуальность вопросов оптимизации энергообеспечения тяги поездов и ежегодного повышения энергоэффективности перевозочного процесса. Необходимо понимать, что с учетом вышеприведенных цифр практически любые реально действующие энергосберегающие средства или технологии в области тяги поездов, при условии их реализации в масштабах компании, способны принести экономию средств, измеряемую миллиардами рублей.

Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» в области приоритетных технологий, потенциально влияющих на уровень конкурентоспособности Холдинга, выделяет, в том числе, следующие:

– интеллектуально-адаптивные системы планирования, нормирования, учета и стимулирования экономии расхода топливно-энергетических ресурсов;

– автоматизированные системы поддержки принятия управленческих решений и планирования технического содержания инфраструктуры и подвижного состава;

– интеллектуальные системы, использующие «интернет вещей» в процессах мониторинга состояния инфраструктуры.

С учетом того, что в современном мире информация и возможности по ее обработке и анализу играют все большую роль, названные выше технологии в полной мере соответствуют перспективам развития отрасли. В том числе их применение должно стать основой и для повышения эффективности энергообеспечения тяги поездов на участках ОАО «РЖД» на основе качественного сбора, обработки, хранения и анализа информации, относящейся к параметрам и характеристикам трех основных блоков, работа которых непосредственно влияет на энергоэффективность тяги поездов:

- 1) система тягового электроснабжения (СТЭ);
- 2) организация движения поездов;
- 3) система управления тяговыми ресурсами (СУТР).

Создание систем мониторинга и планирования энергоэффективности тяги поездов с учетом перспектив увеличения объемов грузоперевозок и сопутствующих им планов по повышению уровня энергоэффективности должно быть основано на использовании интеллектуальных систем и технологий, которые с помощью машинного интеллекта выполняли бы поиск оптимальных решений по внесению изменений в параметры и характеристики указанных выше блоков. Данная статья посвящена подходам к интеллектуализации процессов планирования энергоэффективности тяги поездов.

В целом планирование уровня энергопотребления в ОАО «РЖД» неразрывно с понятием нормирования расхода энергии на тягу поездов и нормирования рекуперации. Выполняется такое нормирование, преимущественно на основе анализа регрессионных зависимостей удельных величин энергопотребления и рекуперации от различных эксплуатационных факторов [1]. С этой целью выполняется статистическая обработка данных маршрутов машинистов и другой отчетности. На подобном подходе основан ряд методик, применяемых сегодня в ОАО «РЖД». Недостаток в этом случае является ограниченность данных расчетных выборок значений (исходных данных).

Другим подходом к анализу и планированию расхода топливно-энергетических ресурсов ОАО «РЖД», является метод, применяемый в методиках, основанных на дифференцировании уравнения движения поезда. Такой подход, например, реализован в методике анализа и прогнозирования расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов, утвержденной ОАО «РЖД» в 2014 году, и в ряде методик, созданных на основе вышеупомянутой. При этом уравнение движения поезда и производные от него описывают движение поезда, и не могут характеризовать работу электрифицированного участка в целом (вместе с работой СТЭ). То есть данный подход вполне применим для анализа расхода топливно-энергетических ресурсов по счетчикам электроподвижного состава и не применим для оценки интегральных показателей энергоэффективности тяги поездов в целом.

Кроме этого в ОАО «РЖД» существует и функционирует так называемая Автоматизированная информационная система энергосбережения и повышения энергетической эффективности (АИС «Энергоэффективность»), которая, однако, не решает задач автоматизированного планирования энергоэффективности тяги поездов. АИС «Энергоэффективность» является автоматизированной системой только в части обмена информацией, учета и оценки выполнения заданий по энергосбережению отдельными структурными подразделениями.

Описанные выше подходы не удовлетворяют требованиям, диктуемым современными реалиями. Так, например, Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» содержит в себе:

во-первых, планы по увеличению объемов перевозок за счет улучшения основных показателей перевозочного процесса;

во-вторых, планы по ежегодному, систематическому снижению уровня энергоемкости тяги поездов.

К основным показателям перевозочного процесса можно отнести: пропускную способность участков, количество провезенных тяжеловесных и сдвоенных поездов, внедрение скоростного и высокоскоростного движения и ряда других. Пути улучшения данных показателей разнообразны, и сводятся в основном к усилению тех самых трех блоков, о которых речь шла выше: усилению СТЭ,

внесению изменений в организацию движения поездов, обновлению парка подвижного состава и структуры его использования на сети дорог.

Основным показателем энергоемкости тяги поездов является удельный расход энергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций. Таким образом, для снижения энергоемкости тяги поездов и повышения ее энергоэффективности необходимо чтобы ежегодные темпы роста производительности перевозок опережали темпы роста энергопотребления на осуществления этих перевозок. Соответственно, для реализации планов по увеличению производительности с параллельным снижением энергоемкости необходимо, чтобы каждый шаг на пути к увеличению объемов перевозок сопровождался оценкой изменения в уровне удельных энергозатрат и поиском оптимальных решений по изменению параметров и характеристик СТЭ, организации движения поездов и СУТР для минимизации энергопотребления при безусловном тяговом обеспечении перевозочного процесса.

То есть, целесообразно при планировании увеличения какого-либо из плановых показателей учитывать также и его взаимосвязь с другими показателями и параллельно планировать и их изменения тоже (в допустимых пределах) с тем, чтобы по итогу достичь максимальной эффективности по интегральным показателям, в том числе и по критерию энергоэффективности.

Чтобы это реализовать недостаточно механизмов и подходов, используемых сегодня в ОАО «РЖД» и кратко описанных выше. В этом вопросе целесообразно создание системы интеллектуального планирования энергоэффективности [2]. Такая система должна формировать конкретные предложения по изменению характеристик и параметров работы отдельных участков железных дорог и конкретных локомотивных депо с целью планомерного достижения перспективных эксплуатационных показателей.

Методы организации научно-исследовательских работ с целью разработки технологий, требуемых для реализации такой системы, могут быть следующие:

- статистические методы построения регрессионных зависимостей по отчетным данным железных дорог;
- методы имитационного моделирования процессов энергообеспечения тяги поездов с целью создания расчетных выборок максимальных размеров, включающих в себя все возможные варианты сочетания всех необходимых к учету факторов [3 – 5].

Поскольку любой набор статистической отчетной информации или информации из систем мониторинга не позволит сформировать выборку, полноценно описывающую взаимосвязи всех возможных значений различных факторов и показателей энергоэффективности, то методы имитационного моделирования в данном случае являются более предпочтительными и дают больше возможностей для всестороннего анализа процессов энергопотребления.

На рисунке 1 показана принципиальная схема работы интеллектуальной технологии планирования улучшения показателей энергоэффективности тяги поездов. В левой части схемы показана упрощенная структура интерфейса автоматизированного рабочего места (АРМ) пользователя предлагаемой системы.

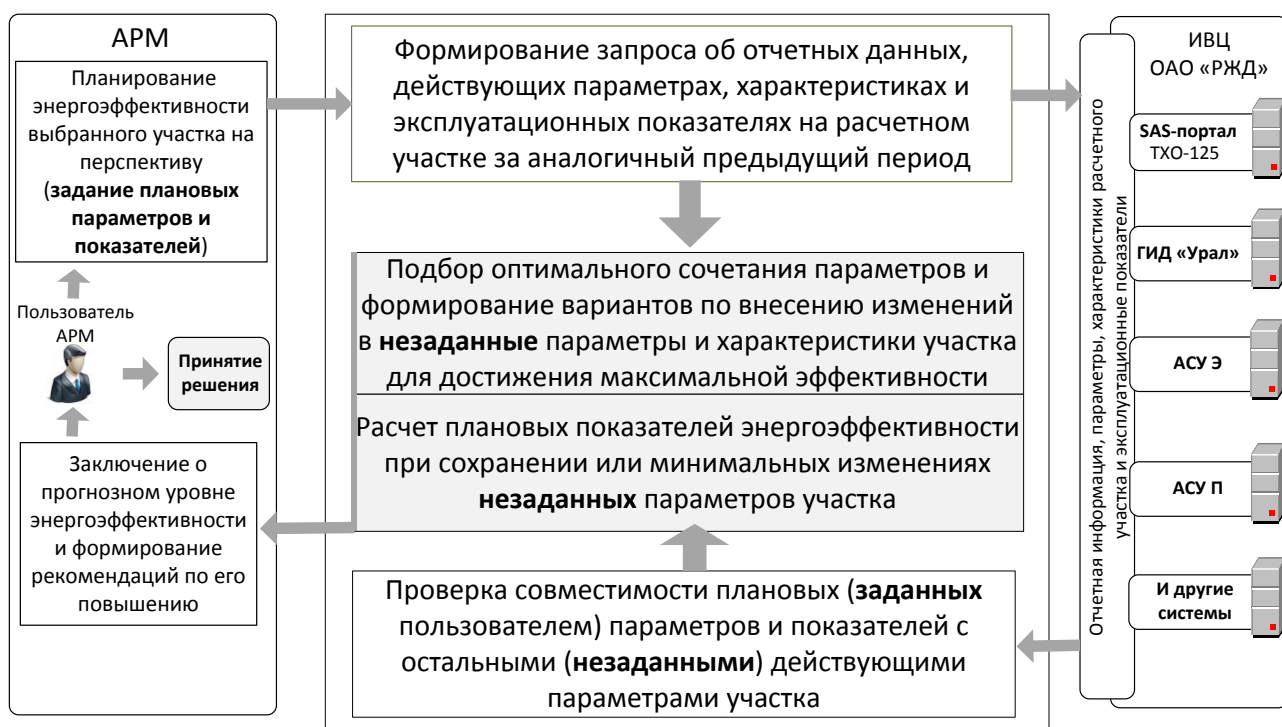


Рисунок 1 – Принципиальная схема работы интеллектуальной технологии планирования показателей энергоэффективности тяги поездов

Планирование энергоэффективности выбранного участка на перспективу с учетом планов по улучшению показателей перевозочного процесса и проектных (перспективных) изменений в параметрах участка, а также с определением перечня неприкосновенных или нежелательных к изменению параметров участка осуществляется в следующей последовательности:

1) пользователь АРМ выбирает необходимый для анализа участок, период расчета на перспективу, задает плановые показатели перевозочного процесса,

указывает проектные изменения в параметрах участка (при наличии) и отмечает неприкосновенные (или нежелательные) к изменению параметры участка;

2) интеллектуальная система (ИС), работа которой основана на предлагаемой интеллектуальной технологии, формирует запрос необходимых для расчета отчетных данных за аналогичный перспективному периоду предыдущий период на серверы Информационных вычислительных центров (ИВЦ) ОАО «РЖД»;

3) необходимые для расчета данные за предыдущий период из соответствующих электронных отчетных форм, хранящихся в ИВЦ, загружаются в ИС;

4) ИС выполняет проверку совместимости плановых (заданных пользователем) параметров и показателей с остальными (незаданными) действующими параметрами участка;

5) ИС выполняет расчет плановых показателей энергоэффективности при сохранении или минимальных изменениях не заданных пользователем параметров участка;

6) ИС выполняет подбор оптимального сочетания параметров и формирование вариантов по внесению изменений в не заданные пользователем параметры и характеристики участка;

7) в АРМ выводится информация о прогнозном уровне энергоэффективности и рекомендации по его повышению;

8) пользователь АРМ принимает решение по оптимизации энергообеспечения тяги поездов на участке для достижения перспективного уровня показателей перевозочного процесса с максимальной энергоэффективностью.

Стоит отметить, что решение по оптимизации энергообеспечения тяги поездов на участке принимает самостоятельно пользователь АРМ, который при этом лишь ориентируется на рекомендации ИС, по сути, оказывающей ему поддержку. Таким образом, предлагаемая технология может стать основой для создания ИС поддержки принятия решений, основанной на работе искусственного интеллекта и направленной на повышение обоснованности принимаемых решений по усилению СТЭ, оптимизации организации движения поездов и системы управления тяговыми ресурсами.

Список литературы

1. Никифоров, М. М. Влияние параметров и режимов работы системы тягового электроснабжения на эффективность использования энергии рекуперации / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, В. И. Гутников – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 1 (29). – С. 74-83.
2. 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.
3. Черемисин, В. Т. Эффективность использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного и переменного тока / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А.С. Вильгельм / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – 216 с. – Текст : непосредственный.
4. Vilgelm, A. S. Concept of intelligent system for controlling regenerative braking and using recovery energy / A. S. Vilgelm, V. T. Cheremisin, M. M. Nikiforov // Siberian Transport Forum – TransSiberia 2018 : MATEC Web of Conferences. Vol. 239. 01039. – 2018. – doi: 10.1051/matecconf/201823901039.
5. Cheremisin, V. T. Intellectual monitoring and planning system of energy efficiency indices of the traction power supply system // V. T. Cheremisin, A. S. Vilgelm / VIII International Scientific Conference Transport of Siberia: IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 918 (2020) 012092. – 2020. – DOI:10.1088/1757-899X/918/1/012092.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Вильгельм Александр Сергеевич
Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Подвижной состав электрических
железных дорог» ОмГУПС.
Тел.: +7-983-528-93-74.
E-mail: vilgelm87@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vilgelm Alexander Sergeevich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Cand.Tech.Sci, Assistant Professor of the
Department «Rolling stock of electric
railways» OSTU.
Phone: +7-983-528-93-74.
E-mail: vilgelm87@gmail.com.

С. Г. Истомир

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

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ СНИЖЕНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ ПРИ ОТСТОЕ НА ТРАКЦИОННЫХ ПУТЯХ ДЕПО

В статье выполнено сравнение существующего метода организации прогрева электровозов на тракционных путях депо с перспективным методом, заключающемся в постройке теплого ангара. Приведены технико-экономические расчеты, которые показали в целом перспективность реализации подобного метода. В дальнейшем требуется более детальная проработка данного проекта в части подбора материалов и устройств отопления для строительства ангара.

Ключевые слова: электроподвижной состав, тракционные пути, энергоэффективность.

Stanislav G. Istomin

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

ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF METHODS AND MEANS OF REDUCING THE CONSUMPTION OF ELECTRIC POWER OF ELECTRIC MOVING STAFF IN THE DEPOT TRACTIONS

The article compares the existing method of organizing the heating of electric locomotives on the traction tracks of the depot with a promising method, which consists in building a warm hangar. The technical and economic calculations are presented, which have shown, in general, the prospects for the implementation of such a method. In the future, a more detailed study of this project is required in terms of the selection of materials and heating devices for the construction of a hangar.

Keywords: electric rolling stock, traction tracks, energy efficiency.

Одной из приоритетных задач холдинга ОАО «РЖД» является

повышение показателей энергетической эффективности во всех сферах деятельности компании (тяга поездов, инфраструктура, ремонт, производство). Одним из наиболее энергоемких видов деятельности компании является тяга поездов, на долю которой приходится около 85% от общего расхода электроэнергии ОАО «РЖД». В структуре расходов Дирекции тяги затраты на электроэнергию на тягу поездов составляют 51,3 % всех расходов (рисунок 1) [1,2].

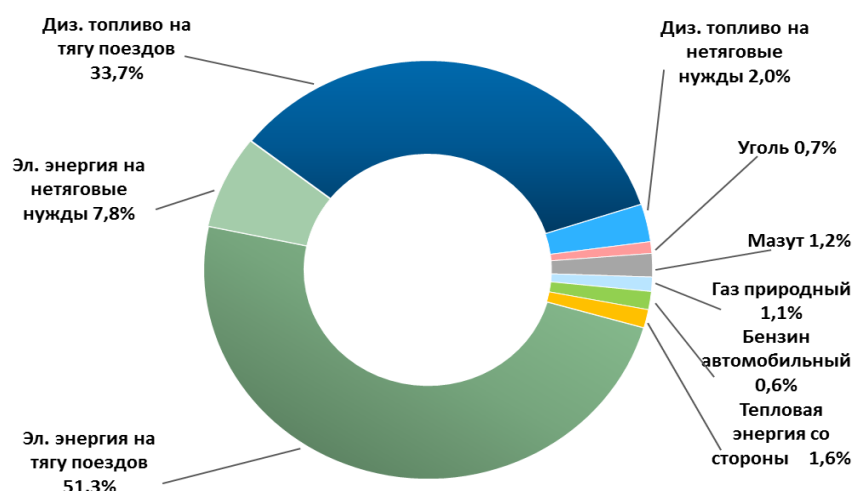


Рисунок 1 – Доля затрат по основным видам энергоресурсов в общих расходах на ТЭР

В последние годы, несмотря на стремительный рост общего расхода электроэнергии на тягу поездов, наблюдается снижение удельного расхода электроэнергии, который в 2016 году составил $104,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/10^4 \text{ т}\cdot\text{км}$ брутто.

В перспективе, руководствуясь данными Энергетической стратегией ОАО «РЖД» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года, снижение удельного расхода электроэнергии на тягу поездов к уровню 2015 года должно составить к 2020 году от 2,5 до 4,4 %, к 2030 году от 8,0 до 9,0 %.

Достичь планового уровня снижения удельного расхода электроэнергии на тягу поездов возможно, в частности, за счет сокращения непроизводительного расхода электроэнергии электроподвижным составом (ЭПС) железных дорог при их отстое на тракционных путях локомотивных депо и в пунктах оборота локомотивных бригад.

В настоящее время учет и контроль за потреблением электроэнергии при «горячем» простое электровозов в ожидании работы без локомотивной бригады осуществляется в соответствии нормативными документами ОАО «РЖД» [3,

4], которые были упомянуты ранее, а также инструктивными указания по заполнению учетной формы ТХУ-3 «Ведомости учета дизельного топлива и электроэнергии на локомотивах и МВПС» (утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 28.12.2012 № 2723р) [5] и положением о порядке взаимодействия ремонтного локомотивного депо и эксплуатационного локомотивного депо (утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 29.12.2012. № 2763р) [6].

В соответствии с данными нормативными документами учет и контроль электроэнергии при отстое электровозов на тракционных путях локомотивных депо и в пунктах оборота локомотивных бригад осуществляется путем записи машинистом - «прогревальщиком» соответствующих показаний счетчиков электрической энергии в отчетность ТХУ-3 и передачи ее для дальнейшей обработки в центре оперативно-технического учета ОАО «РЖД» (рисунок 2).

В данном случае за полноту, своевременность и достоверность ввода данных ведомости ТХУ-3 возложена на начальника данного центра [11].



Рисунок 2 – «Ручной» способ контроля и управления за потреблением электроэнергии ЭПС в границах тракционных путей локомотивных депо и пунктов оборота локомотивных бригад

При подобной организации учета и контроля за потреблением электроэнергии на тракционных путях локомотивных депо и в пунктах оборота локомотивных бригад имеет место быть, несмотря на возложенную на

начальника центра оперативно-технического учета ответственность, отсутствие полноты, своевременности и достоверности данных о расходе электроэнергии.

Необходимо также отметить, что на ЭПС постоянного и переменного тока ОАО «РЖД», преимущественно старых серий, имеются приборы учета электроэнергии, имеющие низкий класс точности и высокий порог чувствительности, что приводит к недоучету расхода электроэнергии при эксплуатации ЭПС в режиме малых нагрузок при работе на тракционных путях локомотивных депо и в пунктах оборота локомотивных бригад.

В целях оценки затрат электроэнергии на прогрев воспользуемся данными отчета «Расход топлива или электроэнергии локомотивами и МВПС без локомотивных бригад» внутренней формы статистической отчетности ОАО «РЖД» ТХО-125. Данный отчет формируется по депо приписки работника, выполняющего прогрев, технологическое маневровое перемещение, экипировку локомотива. Первоисточником для его формирования служит внутренняя форма первичного учета ТХУ-3.

В данном отчете в графе 6 «фактически» указывается фактический расход топлива или электроэнергии на ожидание работы, а также ожидание ремонта и технического обслуживания до передачи по акту в ремонтное предприятие в действующем состоянии по шифрам родов работы.

Итоговые значения расхода электроэнергии в ожидании работы (ТО и ТР) по сериям ЭПС приведены на рисунке 3.

Исходя из приведенных данных, можно сказать, что на участках депо приписки ТЧЭ-2 Омск наибольший расход электроэнергии наблюдается у электровоза 2ЭС6.

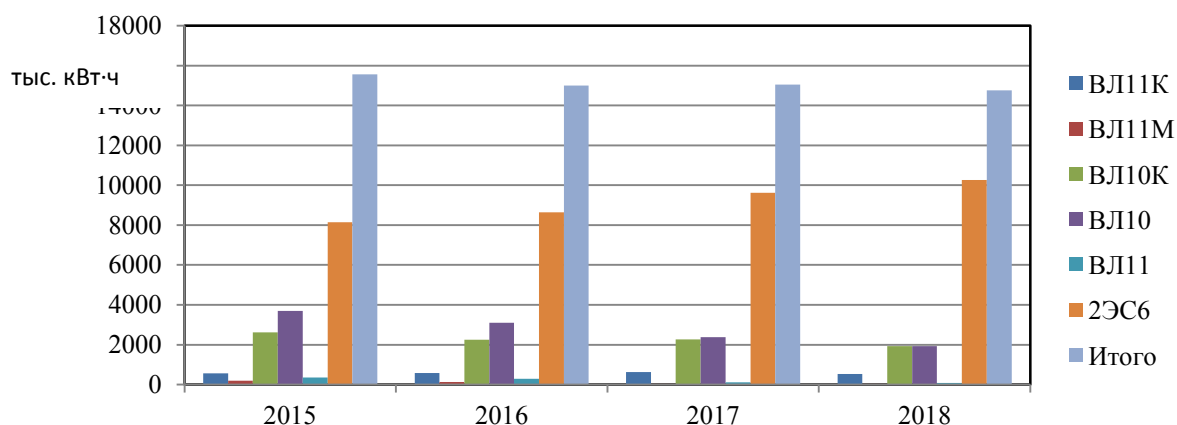


Рисунок 3 – Расход электроэнергии в ожидании работы (ТО и ТР)

Стоимость электроэнергии на отопление рассчитывается по следующей формуле:

$$C_{\text{э}} = \sum \mathcal{E}_{\text{ожид.}} \cdot \tau_{\text{э}}, \quad (1)$$

где $\sum \mathcal{E}_{\text{ожид.}}$ – суммарное потребление электрической энергии в ожидании работы, кВт·ч;

$\tau_{\text{э}}$ – тариф на электрическую энергию, р / кВт·ч. (в 2020 году значение $\tau_{\text{э}}$ принять равным 4,26 р / кВт·ч).

На рисунке 4 приведены финансовые затраты электроэнергии в ожидании работы (ТО и ТР).

Исходя из данных рисунка, можно сделать вывод о том, что ежегодные финансовые затраты на оплату расхода электроэнергии в ожидании работы (ТО и ТР) составляют около 64 млн. рублей.

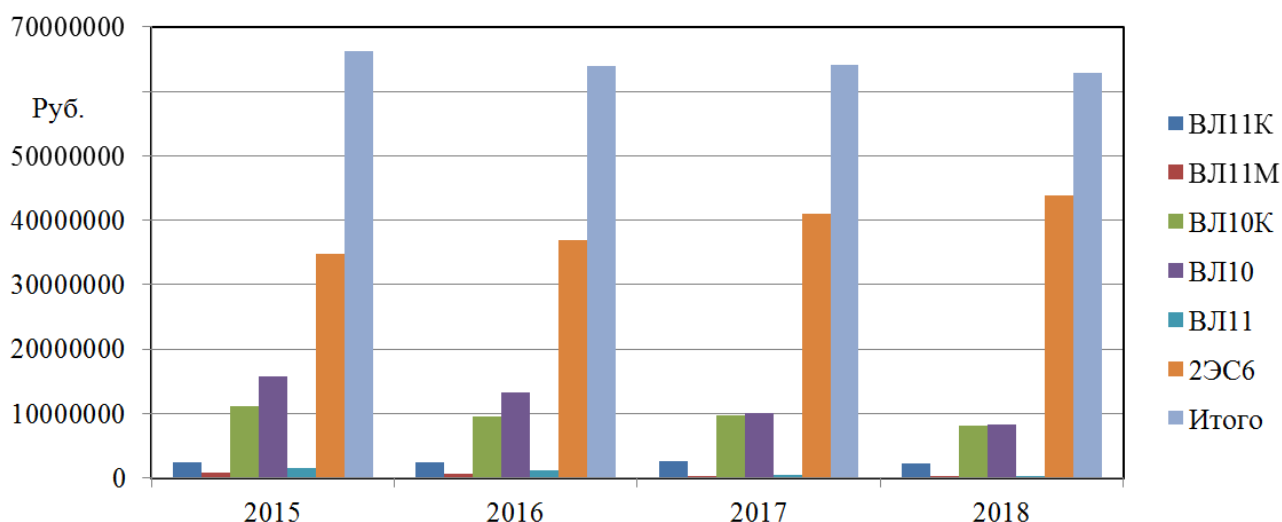


Рисунок 4 – Финансовые затраты на оплату расхода электроэнергии в ожидании работы (ТО и ТР)

Альтернативным вариантом организации прогрева электровазов при отстое на тракционных путях локомотивных депо и пунктах оборота может служить постройка отапливаемого ангара в местах отстоя.

Произведем расчеты на основе реального объекта железнодорожного транспорта – тракционных путей сервисного локомотивного депо Московка (рисунок 5). Габариты ангара представлены на основе масштабов данных карт 2ГИС. Площадь ангара будет составлять 10000 м². Предлагается вариант прямостенного ангара из оцинкованных сэндвич панелей.



Рисунок 5 – Тракционные пути СЛД Москва

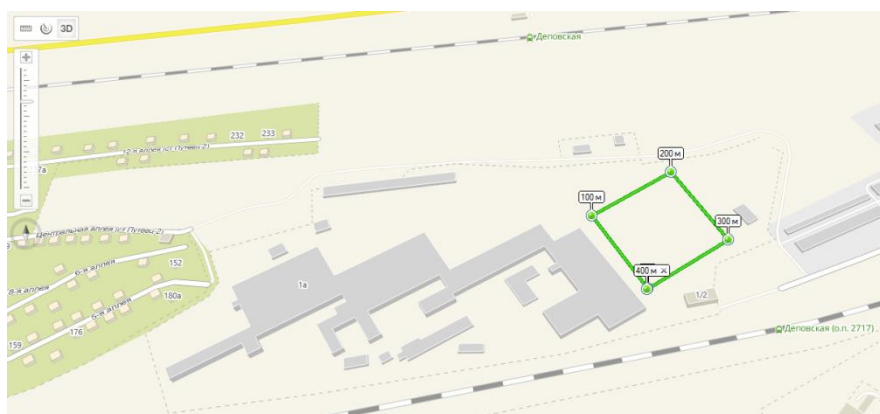


Рисунок 6 – Схема расположения ангара на тракционных путях СЛД Москва

Произведем расчеты тепловой нагрузки ангара площадью 10000 м^2 согласно МДК 4-05.2004 (Методика определения потребности в топливе), которая утверждена Госстроем и согласованна Федеральной энергетической комиссией Российской Федерации.



Рисунок 7 – Прямостенный ангар из оцинкованных сэндвич панелей

Тепловая нагрузка рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{отax}} = \alpha \cdot V \cdot q_o \cdot (t_j - t_o) \cdot (1 + K_{\text{u.p.}}) \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где α – поправочный коэффициент, учитывающий отличие расчетной температуры наружного воздуха для проектирования отопления t_o от $t_o = -30^\circ\text{C}$, при которой определено соответствующее значение q_o ;

V – объем здания по наружному обмеру, м^3 ;

q_o – удельная отопительная характеристика здания при $t_o = -30^\circ\text{C}$, $\text{ккал}/\text{м}^3 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$;

t_o – расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления в местности, где расположено здание, согласно СП 131.13330.2012, $^\circ\text{C}$;

t_j – расчетная температура воздуха в отапливаемом здании, $^\circ\text{C}$;

$K_{\text{u.p.}}$ – расчетный коэффициент инфильтрации, обусловленной тепловым и ветровым напором, т.е. соотношение тепловых потерь зданием с инфильтрацией и теплопередачей через наружные ограждения при температуре наружного воздуха, расчетной для проектирования отопления [7].

Расчетный коэффициент инфильтрации $K_{\text{и.р}}$ определяется по формуле:

$$K_{\text{и.р}} = 10^{-2} \sqrt{2g \cdot L \left(1 - \frac{273 + t_o}{273 + t_j} \right) + w_o^2}, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;

L – свободная высота здания, м ;

w_o – расчетная для данной местности скорость ветра в отопительный период, $\text{м}/\text{с}$; принимается по СНиП 23-01-99 [7].

Удельную отопительную характеристику здания q_o , $\text{ккал}/\text{м}^3 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$ можно определить по формуле:

$$q_o = \frac{a}{\sqrt[n]{V}}, \quad (4)$$

где $a = 1,6 \text{ ккал}/\text{м}^{2,83} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$; $n = 6$ – для зданий строительства до 1958 г.;

$a = 1,3 \text{ ккал}/\text{м}^{2,875} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$; $n = 8$ – для зданий строительства после 1958 г [7].

Расчетное здание расположено в населенном пункте Омск. Объем здания по наружному обмеру равен $90000,0 \text{ м}^3$ ($100 \cdot 100 \cdot 9$), продолжительность

отопительного периода в городе Омске составляет 216 дней, расчетная температура воздуха для проектирования отопления $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$, средняя скорость ветра 2,8 м/с. Температура внутри отапливаемого помещения принята $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ согласно указаниям в действующей инструкции [3]. Нагрузка на отопление здания составит $Q=1,209748\text{ Гкал/ч}$ или 1406,9 кВт.

Отопление ангара больших размеров организовывается по иному принципу, нежели обогрев обычных жилых помещений. Для прогрева холодного склада используется водяное отопление, но вместо обыкновенного радиатора устанавливается радиатор с вентилятором (рисунок 8).

Количество тепловентиляторов определяется отношением необходимой мощности для обогрева, разделенной на мощность одного тепловентилятора, которая зависит от модели и температуры вод. В случае мощности тепловентилятора 47 кВт потребуется 29 тепловентиляторов для отопления ангара.

В таблице 1 приведены суммарные затраты на организацию прогрева электровозов на тракционных путях с использованием ангара.

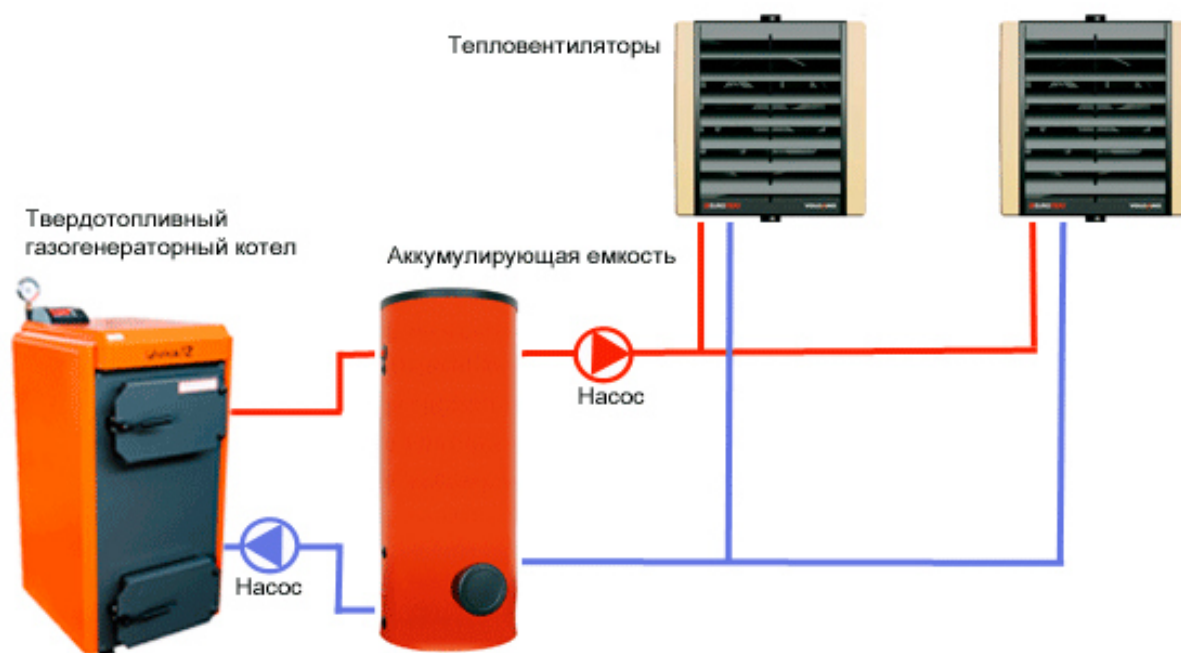


Рисунок 8 – Упрощенная схема отопления ангара

Таблица 1

Сравнение эффективности различных методов и средств снижения потребления электроэнергии ЭПС при отстое на тракционных путях депо

№	Вид расходов	руб.
Существующий вариант организации прогрева		
1	Финансовые затраты на оплату расхода электроэнергии в ожидании работы (ТО и ТР)	64 000 000
2	Годовой фонд оплаты труда машинистов-«прогревальщиков» (10 человек)	8 000 000
Итого		72 000 000
Затраты на постройку и отопление ангара на тракционных путях СЛД Московка площадью 10000 м²		
1	Строительство ангара площадью 10000 м ² (по данным строительных организаций)	60 000 000
2	Тепловентиляторы (29 шт.)	1 682 000
3	Газовый котел	1 800 000
4	Расходы на отопление (из расчета 5 руб. / мес за 1 м ³ и 216 дней отопительного сезона)	3 240 000
Итого		66 722 000

На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы. Если принимать, что ежегодные финансовые затраты на оплату расхода электроэнергии в ожидании работы (ТО и ТР) при существующей системе организации прогрева электровазозов составляют около 64 млн. рублей, то проект организации прогрева электровазозов со строительством ангара окупится на второй год реализации. Однако стоит отметить, что в отчетности ТХО-125 приведены значения по расходу электроэнергии в ожидании работы (ТО и ТР) в целом по ТЧЭ-2 Омск. Данные по тракционным путям СЛД Московка по данной статистической отчетности невозможно вычленишь, поэтому и невозможно дать однозначный ответ по окупаемости данного проекта. Однако данные расчеты могут быть применимы для аналогичных депо с близкими параметрами по расходу электроэнергии в ожидании работы (ТО и ТР).

Список литературы

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2537р.

2. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» № 466р. : утверждена Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2018. / Правительство Российской Федерации. – Москва, 2019. – 135 с.

3. Инструкция по прогреву электровозов при отстое на тракционных путях локомотивных депо и пунктах оборота : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 5.03.2013 № ЦТ-36р.

4. Нормы расхода электрической энергии для электровозов, находящихся в ожидании работы, технического обслуживания или ремонта : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 29.08.2014 № 2032р.

5. Инструктивные указания по заполнению учетной формы ТХУ-3 «Ведомость учета дизельного топлива и электроэнергии на локомотивах и МВПС» : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 28.12.2012 № 2763р.

6. Положение о порядке взаимодействия ремонтного локомотивного депо и эксплуатационного локомотивного депо : утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 29.12.2012. № 2763р.

7. Методика определения потребности в топливе, электрической энергии и воде при производстве и передаче тепловой энергии и теплоносителей в системах коммунального теплоснабжения : утверждена заместителем председателя Госстроя России 12.08.2003.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Истомин Станислав Геннадьевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

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

ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: istomin_sg@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Istomin Stanislav Gennadevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the Department «Rolling stock
electric railways» OSTU.

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

E-mail: istomin_sg@mail.ru.

А. А. Иванов, С. Г. Истомин

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

РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО СОЗДАНИЮ ОМСКОГО ЦЕНТРАЛЬНОГО КОЛЬЦА (ОЦК) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННОГО МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В статье предложена идея внедрения Омского центрального кольца для улучшения динамики передвижения в городском общественном транспорте. Разработан примерный маршрут кольца и выбран подходящий подвижной состав. В дальнейшем требуется более детальная проработка данного проекта в части корректности предложенного маршрута и вопросов его финансирования и окупаемости.

Ключевые слова: Электроподвижной состав, техническое обслуживание, основные показатели эксплуатации, Московское центральное кольцо.

Anton A. Ivanov, Stanislav G. Istomin

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

DEVELOPMENT OF PROPOSALS FOR THE CREATION OF THE OMSK CENTRAL RING (OCR) USING A MODERN MOTOR-WAGON ROLLING STOCK

The article proposes the idea of introducing the Omsk central ring to improve the dynamics of movement in urban public transport. An approximate route of the ring was developed and a suitable rolling stock was selected. In the future, a more detailed study of this project is required in terms of the correctness of the proposed route and issues of its financing and payback.

Keywords: Electric rolling stock, maintenance, basic performance indicators, Moscow Central Ring.

Омск – административный центр и крупнейший по численности населения (1 178,1 тыс. человек) город Омской области, один из 15 городов – миллионников Российской Федерации. Омск является крупным транспортным

узлом Западной Сибири. Согласно Стратегии социально–экономического развития Омской области до 2025 года, утвержденной Указом Губернатора Омской области от 24 июня 2013 года № 93, формирование эффективной городской агломерации вокруг города Омска, а также модернизация города являются важнейшими предпосылками успешного социально–экономического развития региона [1].

Во многих городах мира уже давно внедрена сеть общественных железных дорог, по которым каждый день ходят городские электропоезда.

Помимо мировых городов, такой вид общественного транспорта не нов и для городов нашей страны.

МЦК самый яркий пример пользы городской электрички в большом мегаполисе. По примеру такого проекта можно разработать и внедрить железнодорожный транспорт и в наш город, с учетом уже имеющийся инфраструктуры и финансовой составляющей (рисунок 1).

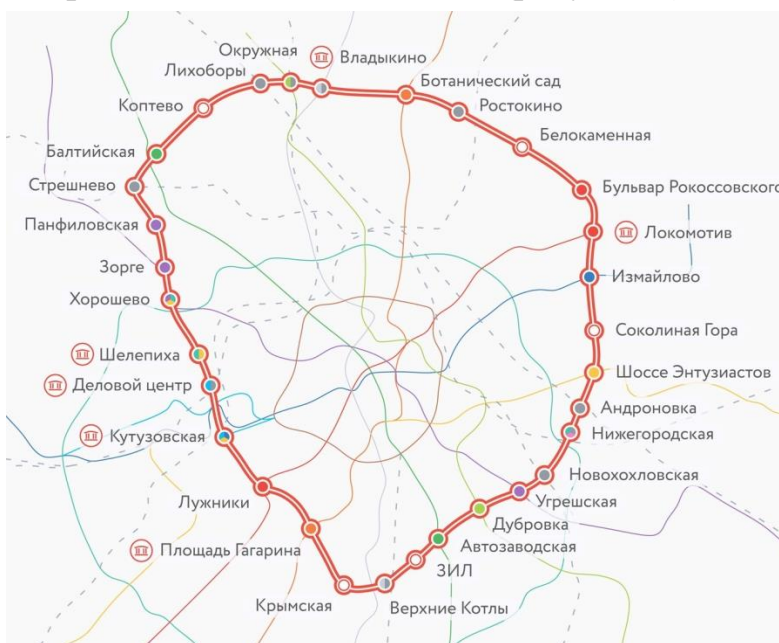


Рисунок 1 – Московское центральное кольцо

Так как в городе Омск используется постоянный ток (3000 В), были рассмотрены пять видов подвижного состава, это ЭП2Д, ЭШ2, ЭГ2Тв «Иволга», ЭП2Тв и ЭС2Г.

Каждый из них имеет свои особенности и свои технические характеристики.

Нужно подобрать самый подходящий электропоезд для нашего города, с учетом максимального комфорта для пассажиров, надежности и удобства эксплуатации.

Огромным плюсом при выборе подвижного состава является его эксплуатация в других городах, это отлично показывает его лучшие достоинства и недостатки, благодаря которым можно с уверенностью сказать, подходит данный электропоезд нашему городу или нет.

В качестве такого подвижного состава подходит ЭС2Г, зарекомендовавший себя на МЦК, пример которого можно взять для строительства Омского кольца.

Главная задача дороги – сделать короче путь из одной удаленной от центра города точки в другую.

Запуск пассажирских перевозок по окружной дороге должен также привлечь внимание жителей и инвесторов к омским промзонам, мимо которых проходит дорога (рисунок 2).

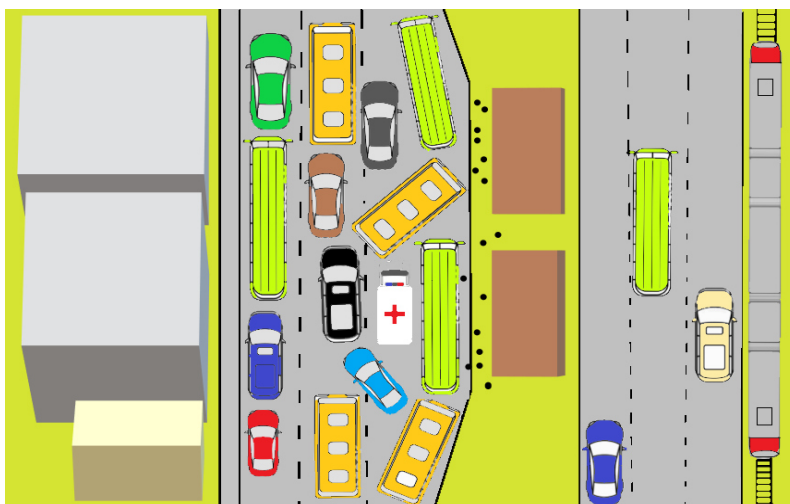


Рисунок 2 – Преимущество внедрения железнодорожного транспорта

При строительстве Омского центрального кольца нужно учесть все заводы и предприятия, все учебные заведения, места с большим количеством людей.

Нужно брать во внимание архитектурную особенность города, так как город основан уже давно и раньше не задумывались о внедрении такого вида транспорта.

Также нужно брать во внимание больницы, торговые центры и развлекательные комплексы.

Строительство такого вида транспорта создаст большое количество рабочих мест, в которых наш город очень нуждается.

Можно взять во внимание те железнодорожные пути города, которые уже существуют, использовать их для дальнейшего строительства или даже внедрить их в основное железнодорожное кольцо.

Учитывая рельеф и протекание реки Иртыш нужно разработать план строительства мостов.

Нужно реконструировать депо ТЧ–31, для дальнейшего приема подвижного состава, для прохождения ТО, ТР и пунктов отстоя.

На рисунке 3 представлена карта с обозначениями главных предприятий города и железнодорожных линий.

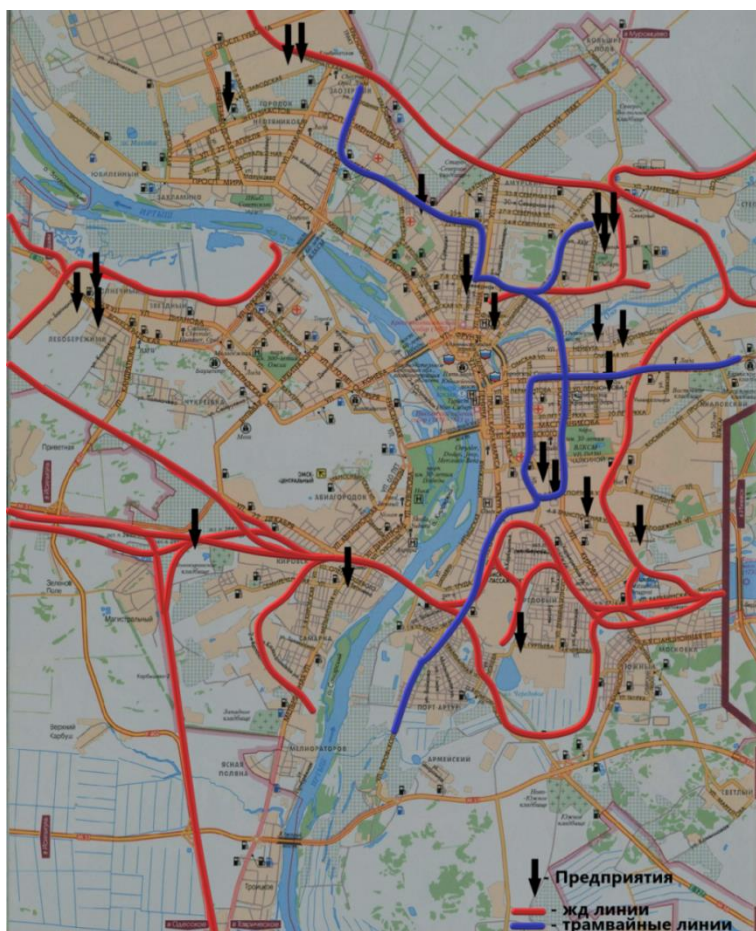


Рисунок 3 – Карта железнодорожных линий и трамвайных путей, а также расположение предприятий

Исходя из имеющихся железнодорожных линий, трамвайных линий и главных предприятий Омска с большим количеством людей, предлагаем для разработки следующий план строительства омского кольца.

Для пункта обслуживания и ремонта подвижного состава можно использовать моторвагонное депо ТЧ – 31. Плюсы данного депо в расположении, так как оно находится близко к центру города, может являться отправной точкой и первой остановкой данного кольца (остановка №1).

Дальнейший путь можно проложить по улице Панфилова, переходящей на улицу Маршала Жукова. На пересечении улиц Маршала Жукова и Маяковского целесообразно сделать остановку №2. В шаговой доступности от остановки находится Омский университет путей сообщения и набережная, которая в выходные дни и в дни праздников превращается в одно из главных мест отдыха омичей. Так же на расстоянии 1,5 км от остановки находится «Парк культуры и отдыха им.30 лет ВЛКСМ», тем самым местонахождение данной остановки будет весьма выгодным и удобным.

Далее движение пойдет по улице Маршала Жукова до пересечения с улицей Лермонтова. Здесь планируется остановка №3, так как рядом с остановкой находятся два крупных омских кинотеатра «Вавилон» и «Атриум», где жители города и его гости проводят свой досуг, а продолжение набережной с прекрасным видом на реку так же собирает большое количество людей.

Маршрут продолжится по улице Лермонтова, и на пересечении с улицей Богдана Хмельницкого будет находиться остановка №4. Здесь расположены места с большим скоплением народа, кроме этого непосредственно у остановки находятся ГИБДД УМВД России по Омской области и городской клинический перинатальный центр. Остановка в данном месте – это экономия времени и возможность быстро решить проблему с передвижением.

Теперь железнодорожные пути пройдут по улице 11 линия и через Октябрьский мост с пересечением реки Омь. Этот район многолюдный, характеризуется большим количеством промышленных предприятий, организаций, административных корпусов. Расположив здесь остановку № 5, будет решен вопрос большой загруженности и затора дорог.

Дальнейшее движение проложим по улице 2 Восточная и дальше по улице Челюскинцев. Делаем следующую остановку (остановка № 6). Выбор объясняется расположением в данном месте МБОУ «Средняя общеобразовательная школа № 93» и городской больницы №8.

Следующую остановку так же планируем в районе школы, что является очень удобным как для учеников, так и для их родителей. Для этого пути

пройдут по улице 24 Северная. Рядом с МБОУ «Средняя общеобразовательная школа № 23» и Сибирским институтом бизнеса и информационных технологий располагаем остановку № 7.

Улица, по которой далее пройдет маршрут кольца, это проспект Академика Королева. Здесь будет остановка №8.

На пересечении улицы Красный Путь с улицей Заозерной, маршрут повернет налево по Заозерной улице. Тут планируем остановку №9. Данные остановки необходимы исходя из расположения в этих районах промышленных комплексов, офисных и торговых центров, развлекательных, образовательных и культурных организаций и других городских объектов.

Продолжится путь кольца через мост 60–летия ВЛКСМ и прямо по улице Лукашевича, на которой будет находиться остановка №10. Место ее выбрано неслучайно. Рядом с остановкой расположены автовокзал города, ТЦ «Маяк», гимназия и школа, а также «Омская Академия МВД России». Остановка подвижного состава в столь людном месте нашего мегаполиса – верное решение вопроса движения людей по городу.

В районе Парка имени 300–летия Омска, расположенного на Волгоградской улице, предлагаем сделать следующую остановку (остановка №11). Тем самым городская достопримечательность пополнится большим количеством отдыхающих омичей и гостей города.

Остановку №12 предлагаем на улице Архитекторов, вблизи ТЦ Мега.

Такое удобное расположение железнодорожных путей и наличие остановки в районе самого большого торгового центра города в лучшую сторону отразится и на работе самого центра, увеличив товароборот и покупательскую способность, что положительно скажется на бюджете города.

Последняя, завершающая остановка №13, будет находиться рядом с улицей Граничная, после чего маршрут пройдет по железнодорожному мосту и вернется к стартовой точке (рисунок 4).

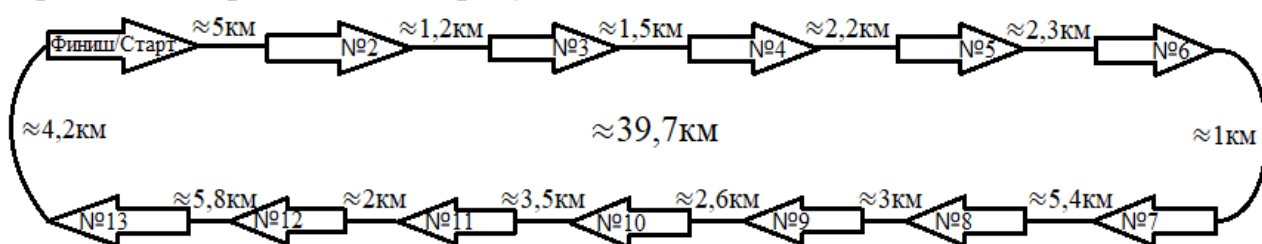


Рисунок 4 – Количество остановок и примерное расстояния маршрута

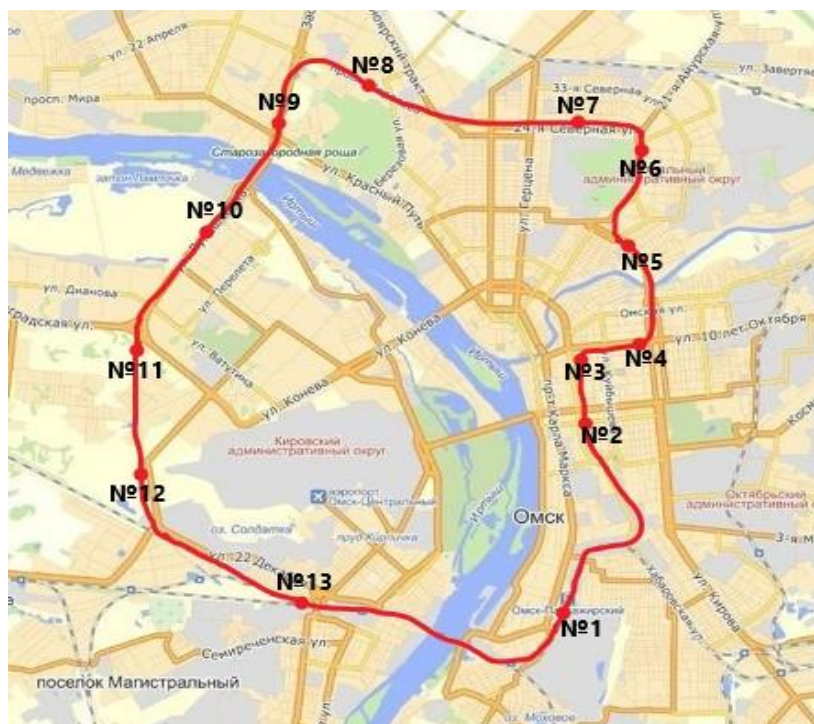


Рисунок 5 – Примерный первоначальный маршрут Омского кольца

Так как профиль пути ОЦК нам неизвестен, точно можно сказать о том, что это будет равнинный профиль, без затяжных спусков и подъемов. Но все же реальный профиль будет известен только на этапе геодезических работ [2].

В связи с этим для примерной оценки эксплуатационных параметров, произвели моделирование ЭС2Г на профиле МЦК.

К рассматриваемым показателям, которые необходимо оценить по результатам каждого расчета, относятся следующие [3]:

- максимальные скорости, достигаемые при движении по перегонам;
- средняя техническая скорость движения поезда по участку;
- средняя участковая скорость движения и коэффициент участковой скорости;
- время, затраченное на поездку;
- расход энергии за поездку;
- рекуперация за поездку;
- удельный расход энергии за поездку;
- удельная рекуперация за поездку;
- доля рекуперации;
- значения токов в режимах тяги и рекуперации за поездку.

Характеристики электропоезда ЭС2Г приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики электропоезда ЭС2Г «Ласточка»

Характеристика	Величина
Номинальное напряжение, В	3кВ
Длина, м	126,46/176,06
Масса, т	260,2
Нагрузка от оси на рельс, т	20
Конструкционная скорость, км/ч	160
Мощность часового режима, кВт	6440
Мощность собственных нужд, кВт	330
Тип тяговых двигателей	Асинхронный двигатель
Вместимость, пассажиров	340
Мощность реостатного тормоза, кВ	5500
Мощность рекуперативного тормоза, кВт	6400

Далее с помощью ЭВМ выполняем моделирование движения электропоезда на МЦК. Остановки продолжительностью 1 минута выполняем на каждом остановочном пункте.

Результаты выполнения моделирования сводим в таблицу 2.

На рисунке 6 и рисунке 7 представлены диаграммы, отображающие максимальные достигаемые значения скорости и отображающие максимальные достигаемые значения тока в режиме тяги и тока в режиме рекуперации на всех перегонах участка.

Таблица 2

Результаты расчетов электропоезда ЭС2Г

Параметры	Результат
Техническая скорость $V_{\text{тех}}$, км/ч	33,4
Участковая скорость $V_{\text{уч}}$, км/ч	25,4
Коэффициент участковой скорости $k_{\text{уч}}$	0,76
Тонно–километровая работа A , 10^4 ткм брутто	3,41
Расход энергии W_p , кВт·ч	2792,3
Рекуперация $W_{\text{рек}}$, кВт·ч	112,4
Удельный расход энергии w_p , кВт·ч/ 10^4 ткм брутто	818,85
Удельная рекуперация $w_{\text{рек}}$, кВт·ч/ 10^4 ткм брутто	32,96
Доля рекуперации $\Delta_{\text{рек}}$, %	4,025

Коэффициент участковой скорости:

$$k_{yч} = \frac{V_{yч}}{V_{mex}}, \quad (1)$$

Тонно–километровая работа, кВт·ч/10⁴ ткм брутто:

$$A = \frac{m_c L_{yч}}{10^4}, \quad (2)$$

где m_c – масса состава, т;

$L_{yч}$ – длина участка, км.

Удельный расход энергии, кВт·ч/10⁴ ткм брутто:

$$W_p = \frac{W_p}{A}, \quad (3)$$

где W_p – расход энергии за поездку, кВт·ч.

Удельная рекуперация, кВт·ч/10⁴ ткм брутто:

$$w_{рек} = \frac{W_{рек}}{A}, \quad (4)$$

где $W_{рек}$ – рекуперация за поездку, кВт·ч.

Доля рекуперации, %:

$$\Delta_{рек} = \frac{W_{рек}}{W_p} \cdot 100\% \quad (5)$$

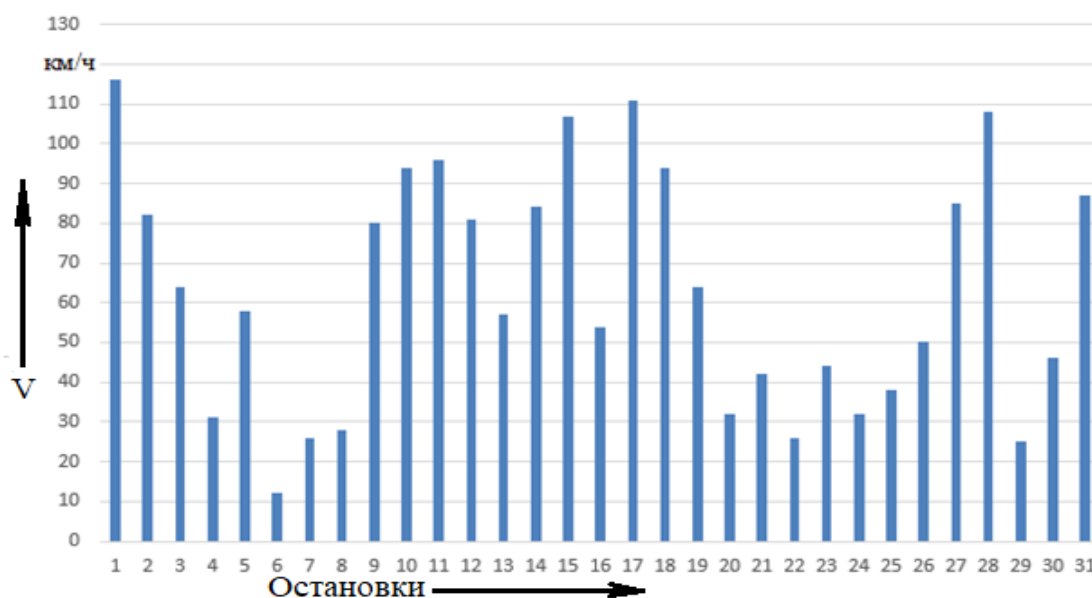


Рисунок 6 – Диаграмма, отображающая максимальные достигаемые значения скорости на всех перегонах участка

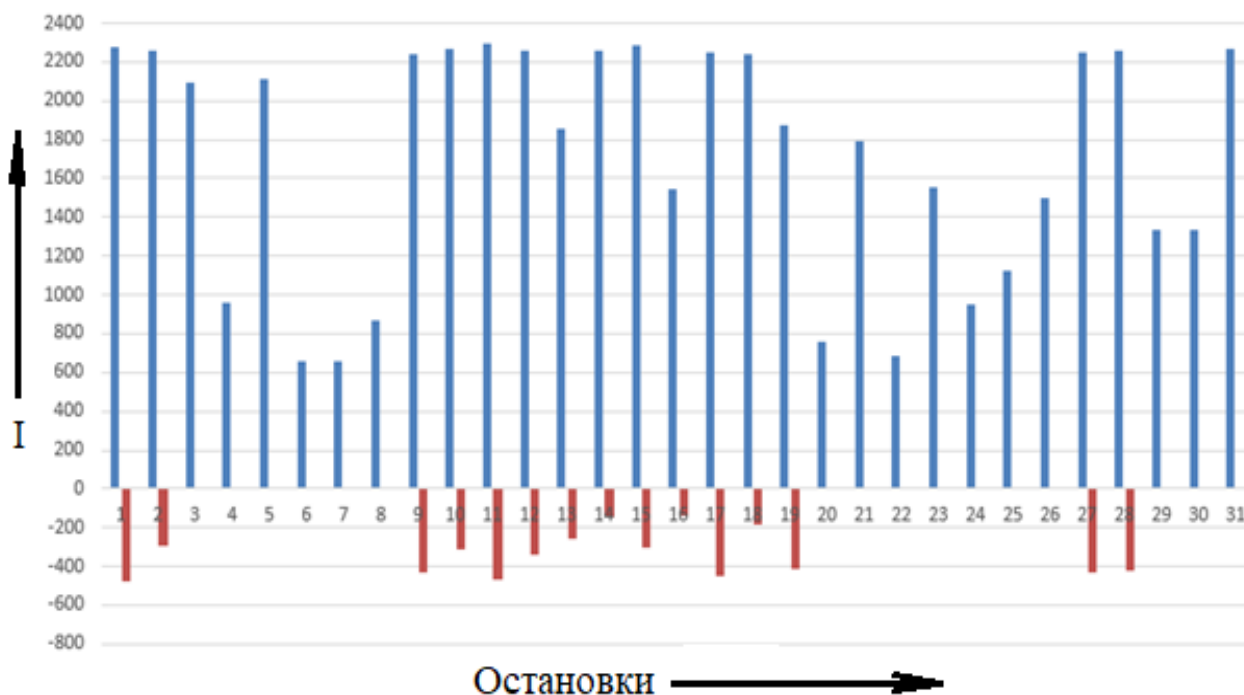


Рисунок 7 – Диаграмма, отображающая максимальные достигаемые значения тока в режиме тяги и тока в режиме рекуперации на всех перегонах участка

Исходя из проделанного расчета, важным показателем для пассажира является время, которое он затрачивает на поездку. Так при длине маршрута 54,7 км, время хода составила 98,2 минуты, с учетом 31 остановки. Максимальное значение тяговых токов на перегонах МЦК 2291 А, а минимальное 662 А. Максимальное значение токов в режиме рекуперации на перегонах МЦК 0 А, а минимальное –473 А.

Проанализировав в данной работе значимость движения подвижного состава по городу и целесообразность каждой остановки, сделали вывод, что, несмотря на большие финансовые затраты строительства данного кольца, ввод в эксплуатацию городской электрички будет способствовать если не ликвидации проблем передвижения горожан, то значительного уменьшения затрачиваемого времени на передвижение. При этом экономичность и экологичность данного транспорта будет хорошим решением многих социально – экономических внутригородских вопросов.

Список литературы

1. Омская агломерация // Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет : сайт– URL: <https://sibadi.org/proekt-bezopasnye-i-kachestvennye-doogi/omskaya-gorodskaya-aglomeratsiya/> (дата обращения 20.11.2020). – Текст : электронный.
2. Методические указания по определению технико-экономической эффективности новых и усовершенствованных электровозов – Москва : Транспорт, 1986. – Т. 1. – 117 с. – Текст : непосредственный.
3. Вильгельм, А. С. Учебно-методическое пособие к выполнению лабораторных работ при изучении дисциплины "Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава" / А. С. Вильгельм / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2018. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванов Антон Александрович

Вагонное ремонтное депо Московка АО
«Вагонная ремонтная компания -2».
Слесарь по ремонту подвижного состава.
Тел.: +7-913-626-11-82.
E-mail: ivanovanton19031997@gmail.com.

Истомин Станислав Геннадьевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент
кафедры «Подвижной состав электрических
железных дорог» ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-34-19.
E-mail: istomin_sg@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanov Anton Aleksandrovich

Wagon repair depot Moskovka JSC "Wagon
repair company -2".
Locksmith for the repair of rolling stock.
Phone: +7-913-626-11-82.
E-mail: ivanovanton19031997@gmail.com.

Istomin Stanislav Gennadevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the Department «Rolling stock
electric railways» OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-34-19 .
E-mail: istomin_sg@mail.ru.

В. Л. Незевак, В. Т. Черемисин

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В статье рассмотрены основные направления совершенствования методов и алгоритмов расчета энергетических показателей системы тягового электроснабжения. Одним из направлений повышения точности расчетов энергетических показателей системы тягового электроснабжения является учет изменения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава при выполнении тяговых расчетов. Повышение функциональности современных программных комплексов связано с совершенствованием методов расчетов, дополнением схем замещения и учета алгоритмов работы регулируемого оборудования в системе тягового электроснабжения.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, энергетические показатели, методы расчета, имитационное моделирование, алгоритмы, схема замещения, устройства усиления, средства компенсации реактивной мощности, системы накопления электроэнергии.

Vladislav L. Nezevak, Vasily T. Cheremisin

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

IMPROVING METHODS AND ALGORITHMS THE CALCULATION OF ENERGY PERFORMANCE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEMS

The article considers the main directions of improving methods and algorithms for calculating the energy indicators of the traction power supply system. One of the ways to improve the accuracy of calculations of energy indicators of the traction power supply system is to take into account changes in the voltage on the current collector of electric rolling stock when performing traction calculations. The increase in the functionality of modern software systems is associated with the improvement of calculation methods, the addition of replacement schemes and accounting algorithms for the operation of regulated equipment in the traction power supply system.

Keywords: traction power supply system, energy indicators, calculation methods, simulation modeling, algorithms, substitution scheme, amplification devices, reactive power compensation means, power storage systems.

Необходимость моделирования работы систем тягового электроснабжения с целью определения энергетических показателей при оценке эффективности нового оборудования и технологий обусловлена сложностью проведения физических экспериментов на действующих объектах тягового электроснабжения. Эволюция развития методов расчета показателей работы систем тягового электроснабжения привела к появлению и дальнейшему развитию методов имитационного моделирования, вобравших в себя преимущества ранее разработанных методов равномерных и характерных сечений графика движения поездов [1, 2].

Разработка методов расчета показателей систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока в 1950-60-х гг. была связана с необходимостью достижения простоты и приемлемой точности расчетов в условиях отсутствия достаточно мощных вычислительных средств. Появившиеся в данное время методы принято относить к методам двух групп: первой, где расчеты выполняются на основе заданных графиков движения поездов; второй, где расчеты основаны на заданных объемах перевозок или грузообороте. Появление, развитие и распространение в 1980-х гг. средств вычислительной техники привело к необходимости повышения точности расчетов известных методов за счет выполнения необходимых вычислительных процедур и обусловило появление метода имитационного моделирования взаимодействия электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения.

Основным преимуществом, которым обладали методы имитационного моделирования, стало повышение точности расчетов за счет уменьшения шага моделирования при выполнении тяговых и электрических расчетов. Необходимость решения различных задач по оценке изменения показателей и эффективности работы системы тягового электроснабжения привела к появлению программных средств, позволяющих на основе известных данных методами имитационного моделирования выполнить расчеты. Для выполнения тяговых расчетов в настоящее время применяется ряд различных

специализированных программных комплексов: «Комплекс расчетов тягового электроснабжения (Кортэс)», «Искра-ПТР», ПК «ЭРА», MoveRW, «Вектрум», а также ряд моделей, расчеты для которых реализуются в других комплексах расчетов и моделирования, например, Matlab и др. В качестве основного программного комплекса, применяемого для оценки пропускной и провозной способности участков, выполнения тяговых и электрических расчетов, расчетов аварийных режимов и др. применяется программный комплекс «Кортэс», который реализует метод имитационного моделирования, основанный на методе равномерных сечений графика движения поездов.

Несмотря на достоинства существующих методов имитационного моделирования и их успешную реализацию в ряде программных комплексов, как методам, так и программной среде присущ ряд недостатков.

К основным недостаткам нашедшего применение метода имитационного моделирования относят допущения о постоянстве напряжения на токоприемнике электроподвижного состава и сохранение токовой нагрузки поезда вне зависимости от расчетного уровня напряжения на токоприемнике при проведении электрических расчетов. Указанное допущение позволило выполнить декомпозицию и упростить проведение тяговых и электрических расчетов, поскольку тяговые и электрические расчеты выполнялись в два этапа. На первом этапе подлежала определению нагрузка поезда с привязкой к ординате участка. На втором – на основе графика движения поездов определялось распределение нагрузок в границах межподстанционных зон и суммарная нагрузка тяговых подстанций.

Появление технологий организации движения, позволяющих снизить количество остановок, управлять режимом ведения поезда в зависимости от поездной обстановки или управлять расстоянием между поездами на основе «виртуальной автосцепки» при изменении графика движения, а также требований к программным комплексам в части расчета показателей работы системы тягового электроснабжения в режиме реального времени требуют внесения дополнений в методы и алгоритмы расчетов в части соотнесения тяговых расчетов и изменяющегося графика движения поездов [3, 4].

Кроме это требуется соотнести изменение напряжения на токоприемнике электроподвижного состава при следовании в границах межподстанционных зон с уровнем напряжения на этапе проведения тяговых расчетов. Отказ от

декомпозиции при проведении расчетов позволяет повысить их точность и учесть, как тяговые характеристики электроподвижного состава, так и связанные с ними показатели работы системы тягового электроснабжения на каждом шаге моделирования.

Изменение метода расчета приведет к необходимости изменения алгоритмов расчета (алгоритмов проведения тяговых расчетов, расчета графика движения поездов и электрических расчетов) и программного обеспечения. Кроме этого, при разработке программного обеспечения необходимо расширить функциональность существующих программных средств.

Исходя из перечня задач, стоящих перед энергетическим комплексом ОАО «РЖД», требует расширения функциональности применяемый программный комплекс «Кортэс».

В качестве примера требующих расширения функциональных возможностей можно привести следующие:

1) расчет несимметрии напряжений на стороне высшего напряжения подстанций при влиянии тяговой нагрузки;

2) проведение расчетов для произвольных режимов питания межподстанционных зон, в условиях многопутности и замкнутости схем (кольцевые маршруты), реконфигурации схем питания и секционирования;

3) реализация алгоритма тяговых расчётов с учётом действия различных систем управления на новых сериях электроподвижного состава, включая функции ограничения тяговой мощности в зависимости от уровня напряжения на токоприёмниках;

4) реализация существующих и перспективных устройств усиления систем тягового электроснабжения, в т.ч. регулируемых, алгоритмов их управления, характеристик выпрямительных и инверторных преобразователей. К указанным устройствам относятся устройства регулирования напряжения на основе управляемых реакторов, средств поперечной компенсации, выпрямительно-инверторные преобразователи, системы накопления электроэнергии и др.;

5) реализация возможности записи и построения графиков нагрузки, напряжения и мощности выбранного присоединения подстанции и линейного устройства, электроподвижного состава с выделением режимов тяги,

рекуперативного торможения и выбега на этапе проведения тяговых и электрических расчетов;

б) реализация заданного алгоритма ведения поезда (с максимальной скоростью, в режиме энергосбережения, с минимизацией остановок и т. д.).

Указанные направления развития метода имитационного моделирования и существующего программного обеспечения направлены на повышение точности и функциональности, расширяющие возможности различного рода технико-экономических расчетов.

Одним из направлений развития являются моделирование и расчеты по оценке эффективности применения систем накопления электроэнергии на тяговых подстанциях или в границах межподстанционных зон [5, 6].

При реализации указанной функциональности требуют корректировки и дополнения алгоритмы тяговых расчетов, расчета изменения графика движения и электрических расчетов. В частности, алгоритмы работы регулируемых устройств, изменяющие свои параметры в зависимости от показателей работы системы тягового электроснабжения, например, статические компенсаторы и системы накопления электроэнергии [7 – 9].

В связи с этим возникает необходимость учета изменения функциональности существующих методов по определению энергетических показателей систем тягового электроснабжения, например [10].

Совершенствование методов имитационного моделирования и алгоритмов расчетов энергетических показателей работы системы тягового электроснабжения с учетом расширения функциональности заключается в разработке порядка расчетов, схем замещения и алгоритмов расчета и управления режимами работы различных устройств. Предложенные направления совершенствования методов и алгоритмов расчета связаны с повышением точности и учетом особенности работы различных устройств систем тягового электроснабжения и электроподвижного состава.

Список литературы

1. Незевак, В. Л. Направления совершенствования метода расчета энергетических показателей системы тягового электроснабжения с накопителями электроэнергии / В. Л. Незевак. – Текст: непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на

транспорте : сборник трудов науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщ. – Омск. – 2020. – С. 251-256.

2. Незевак, В. Л. Метод расчета параметров системы тягового электроснабжения с корректировкой тяговых расчетов при изменении напряжения на токоприемнике электроподвижного состава / В. Л. Незевак. – Текст: непосредственный // Инновации в системах обеспечения движения поездов : сборник трудов науч.-практ. конф. / Самарский гос. ун-т путей сообщ. – Самара. – 2016. – С. 76-77.

3. Бакланов, А. А. Классификация методов оценки эффективности рекуперативного торможения / А. А. Бакланов, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Текст: непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 1 (61). – С. 26-33.

4. Патент № 2591560, Россия, МПК G06F 17/50 (2006.01), B60L 7/00 (2006.01). (РФ) Способ имитационного моделирования энергоэффективного графика движения поездов на электрифицированных железных дорогах : 2015105233/11 : заявлено 16.02.2015 : опубликовано 20.07.2016 / В. Л. Незевак, В. Т. Черемисин, А. П. Шатохин; –5 с. – Текст: непосредственный.

5. Незевак, В. Л. Моделирование процессов работы гибридного накопителя электроэнергии в системе тягового электроснабжения на физической модели. Часть 1 / В. Л. Незевак, Ю. В. Плотников, А. П. Шатохин. – Текст: непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2020. – № 1. – С. 33-37.

6. Незевак, В. Л. Моделирование процессов работы гибридного накопителя электроэнергии в системе тягового электроснабжения на физической модели. Часть 2 / В. Л. Незевак, Ю. В. Плотников, А. П. Шатохин. – Текст: непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2020. – № 2. – С. 26-30.

7. Незевак, В. Л. Моделирование режимов работы накопителя электроэнергии на шинах поста секционирования в условиях пропуска тяжеловесных поездов / В. Л. Незевак. – Текст: непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 3 (59). – С. 47-57.

8. Незевак, В. Л. Моделирование режимов нагрузки на шинах постов секционирования при работе в системе тягового электроснабжения накопителей

электроэнергии / В. Л. Незевак. – Текст: непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4 (68). – С. 159-170.

9. Nezevak, V. Interaction's Simulation Modeling of Electric Rolling Stock and Electric Traction System / V. Nezevak, A. Shatokhin // 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – doi:10.1109/uralcon.2019.8877672.

10. Патент № 2690126, РФ, МПК В60М 3/00 (2006.01), В60L 3/12 (2006.01), G01R 21/133 (2006.01) – 2016 119647/11. Способ определения энергетических показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения : заявлено 23.07.2018 : опубликовано 30.05.2019 / В. Л. Незевак, В. Т. Черемисин, А. П. Шатохин. – Текст: непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Незевак Владислав Леонидович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент
кафедры «Электроснабжение
железнодорожного транспорта» ОмГУПС.
Тел.: (3812) 44-39-23.
E-mail: nezevakwl@mail.ru.

Черемисин Василий Титович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Доктор технических наук, зав. кафедрой
«Подвижной состав электрических
железных дорог», директор научно-
исследовательского института
энергосбережения на железнодорожном
транспорте (НИИЭ ОмГУПС) ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-19.
E-mail: eps@omgups.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nezevak Vladislav Léonidovitch

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Candidate of technical sciences, Department
«Power supply of railway transport» OSTU.
Phone: (3812) 44-39-23.
E-mail: nezevakwl@mail.ru.

Cheremisin Vasily Titovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Doctor of technical Sciences, head.
Department of «Rolling stock of electric
Railways», Director of the research Institute
of energy saving in railway transport (NIIÉ
OSTU) OSTU.
Tel.: (3812) 31-34-19.
E-mail: eps@omgups.ru.

«ИССЛЕДОВАНИЕ, ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТРАНСПОРТА»

УДК 621.313

Ф. Веселка¹, Я. Пишала², В. Н. Забоин³

¹Брненский технический университет, г. Брно, Чешская Республика,

²Пригородные железные дороги Йиндржихув-Градец, Чешская Республика,

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),
г. Санкт-Петербург, Российская федерация

ДЛИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ИННОВАЦИОННОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА НА ЛОКОМОТИВЕ УЗКОКОЛЕЙНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ В ЧЕХИИ

Работа посвящена исследованию работы инновационного скользящего контакта с применением тефлона в рабочей зоне скользящего контакта в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: двигатель постоянного тока, коллекторно-щеточный узел, износ, электрические щетки, теория подобия.

Veselka František¹, Jan Píšala², Valery N. Zaboин³

¹Brno University of Technology, Brno, Czech Republic,

²Jindřichův Hradec local railways, Czech Republic,

³Saint-Petersburg Polytechnical University (SPPU), Saint-Petersburg, the Russian Federation

LONG-TERM TEST OF AN INNOVATED SLIDING CONTACT ON A LOCOMOTIVE OF A NARROW-GAUGE RAILWAY IN THE CZECH REPUBLIC

The work is devoted to the study of the innovative sliding contact with the use of Teflon in the working area of the sliding contact under operating conditions.

Keywords: DC motor, collector-brush unit, wear, electric brushes, similarity theory.

1. Введение

На основе длительных исследований и экспериментальных испытаний в KESAP FE BUT в городе Брно было установлено, что тефлон можно использовать для улучшения рабочих свойств скользящего контакта. В результате нанесения тефлона на поверхность электрических щеток коэффициент трения на поверхности коллектора уменьшается и стабилизируется. Можно сказать, что применение тефлона на электрических щетках дает комплексные эффекты по сравнению, например, с сульфидом молибдена. В случае исследования работы тяговых двигателей, установленных на локомотиве, эксплуатируемого на узкоколейной железной дороге города Йиндржихув-Градец Чешской республики было невозможно нанести тефлоновое покрытие, например, на внутреннюю часть корпуса щеткодержателя и тем самым способствовать уменьшению зазора между щеткой и щеткодержателем, пружины сжатия, что в конечном итоге приводит, например, к расширению зоны контактного тока, повышению стабильности структуры пленки, уменьшению влияния рабочих условий на качество пленки и уменьшению влияния температуры на качество и стабильность пленки.

2. Тяговые двигатели ŠKD TM35 / 15x4 и их характеристики

В конце 1940-х для локомотива ŠKD был испытан тяговый двигатель постоянного тока TM35/15x4, спроектированный для новых трамваев. Двигатели зарекомендовали себя в эксплуатации и впоследствии были изготовлены для новых узкоколейных локомотивов серии T47.0 (в России тип ТУ3), производство которых проходило на заводе ЧКД-Прага в период с 1954 по 1958 год. Они были поставлены в Чехословакию (21 шт.) и в Советский Союз (45 штук) тремя серийными партиями, в конечном счете было поставлено 66 единиц. Эти тепловозы полностью вытеснили оставшиеся паровозы на всех узкоколейных железных дорогах Чехословакии с шириной колеи 750 и 760 мм. В настоящее время тепловозы этой серии, несмотря на их преклонный возраст, эксплуатируются на узкоколейных железных дорогах, что делает их одними из старейших регулярно эксплуатируемых локомотивов в Чешской Республике. Технические параметры этих тяговых двигателей приведены в таблице 1.

Внешний вид тягового электродвигателя TM35/15x4 показан на рисунке 2.

Таблица 1

Технические параметры тягового двигателя ТМ35/15х4

Технические параметры двигателя ТМ35/15х4			
Номинальные параметры		Скользящий контакт	
Мощность	40 кВт	Диаметр коллектора	280 мм
Ток	115 А	Количество ламелей	185
Напряжение	400 В	Ширина ламели	4 мм
Частота вращения	590 об/мин	Ширина зазора	0,8 мм
Число полюсов	4	Параметры передачи	
Возбуждение	Серийное	Передача	Зубчатая, боковая
Вентиляция	Внешняя	Передаточное число	85:15
Класс изоляции	В	Диаметр колеса	760 мм
Масса	730 кг	Окружность колеса	2387 мм



Рисунок 1 – Тепловоз Т47.005, на котором производился замер

Сегодня в тяговых электродвигателях используются разъемные щетки, хотя изначально они были оснащены монолитными щетками. Изменение вызвано техническим прогрессом в конструкции скользящего контакта. Чаше расщепленные кисти стали применять позже.

Устройство токосъема тягового электродвигателя ТМ35/15х4 состоит из: опорного стального кольца (9), в которых ввинчивается восемь поддержки затычки (10), два для каждого держателя щетки (11), а также из четырех щеток (12) размером 16х40х50 типа EG40А симметрично распределенных по окружности.

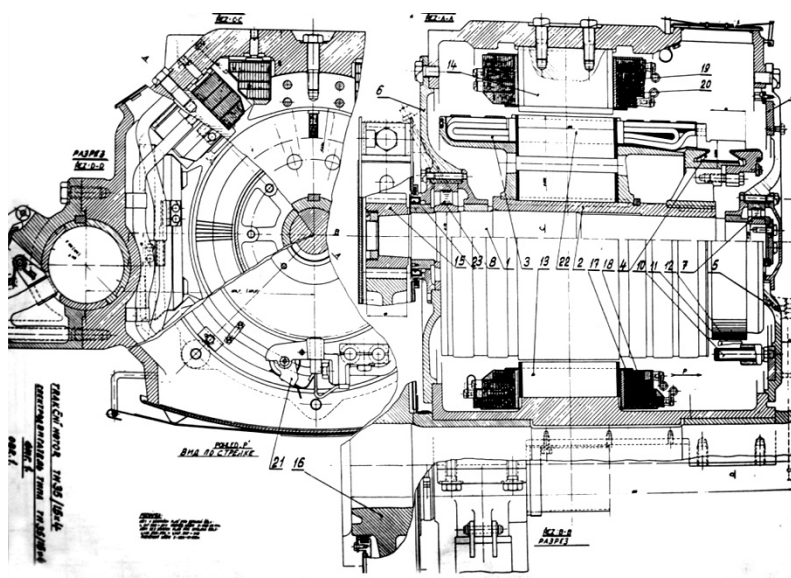


Рисунок 2 – Двигатель TM35/15x4

2.1 Условия эксплуатации тепловозов Т47.0

Сегодня локомотивы Т47.0 эксплуатируются на всех узкоколейных линиях в Чешской Республике. Они предназначены для маневрового и путевого обслуживания, перевозят пассажирские и грузовые поезда, рассчитаны на максимальную скорость 50 км/ч, средний суточный пробег достигает 200 км.

Испытания проводились на ветках местной железной дороги города Йиндржихув-Градец с февраля по май 2019 года. Измерения тяговых двигателей № 1 и 4 проводились на локомотиве Т47.005, который является самым старым локомотивом, регулярно эксплуатируемым в нашей стране с 1954 года. Южная линия имеет протяженность 33 км ведет от Йиндржихув-Градец до Нова-Быстрице и существует с 1897 года. Наивысший уклон линии - 18 ‰, минимальный радиус поворота - 120 м, высота над уровнем моря - 203 м.

Во время испытаний электродвигателей весной 2019 года на линии эксплуатировались четыре пары пассажирских поездов, которые нерегулярно пополнялись товарными поездами Градец – Кунжак. Обычная масса пассажирских поездов 46 т, грузовых 90 - 210 т. Линия Йиндржихув-Градец – Обратан была введена в эксплуатацию в 1906 году. Ее длина 46 км, самый высокий спуск 26 ‰, минимальный радиус изгиба 100 м, высота 196 м. Согласно расписанию на 2019 год на линии ежедневно курсировало 8 пар поездов, дополнившихся двумя парам поездов ходящи из Йиндржихува-Градеца в Каменице-над-Липоу в настоящее время. Обычный вес комплектов 46 т.

2.2 Инновационные щетки

Для практической отработки теоретических знаний была начата разработка набора щеток для одного двигателя. Были модифицированы четыре новые отдельные щетки EG680 производства фирмы MONS Carbon Plzeň. Нововведение заключалось в фрезеровании части широкой тангенциальной стенки двух половин разделенной щетки и последующем приклеивании тефлоновой пластины толщиной 0,5 мм. Разъемная щетка значительно усложняла эту модификацию в техническом отношении, так как обработка «внутренней» стенки щетки была очень сложной. Представленные изменения показаны на рисунках 3,4. В рамках исследования были обновлены только тело щетки, корпус щеткодержателя остались в исходном состоянии.

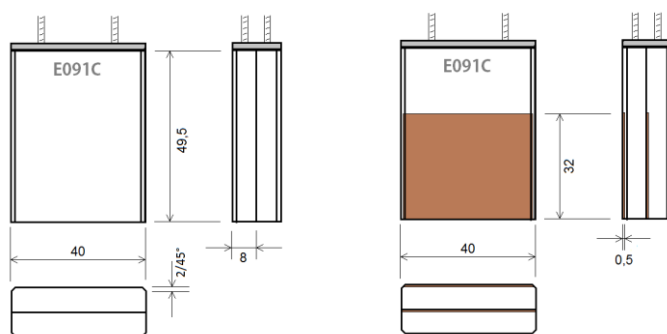


Рисунок 3 – Размеры отдельной щетки EG680. Слева – щетка оригинального дизайна, справа – щетка нового дизайна



Рисунок 4 – Инновационная отдельная щетка EG680 для двигателей ТМ35/15х4 с нанесенными слоями тефлона

3.1 Длительный тест на износ щеток

Тяговый двигатель имеет особый режим работы, поскольку он работает с переменной скоростью (пропорциональной скорости локомотива), нагрузкой

(установленный вес, уменьшенный профиль пути) и влиянием окружающей среды (температура, влажность, пыль и т. д.). В случае локомотивов также есть регулярные изменения направления вращения двигателей, которые, однако, почти идеально симметричны из-за условий работы на линиях JHMD (локомотив не может быть повернут никуда). Для измерений на локомотиве T47.005 были выбраны двигатели предельной тяги №1 и 4. На двигателе №1 поставлены новые щетки со слоем тефлона, на двигатель №4 также поставлены новые, но немодифицированные щетки. Все восемь щеток были помечены, как показано на рисунке 5.

Теоретически для достижения максимального эффекта от применения новых щеток необходимо сделать так чтобы слой тефлона, нанесенный на тело щетки находился на набегающем крае щетки и совпадал с направлением вращения двигателя. Однако, на тяговых двигателях локомотивов достичь этого практически невозможно. В связи с этим обновленные щетки были расположены попеременно по и против направления вращения коллектора, что показано на рисунке 5.

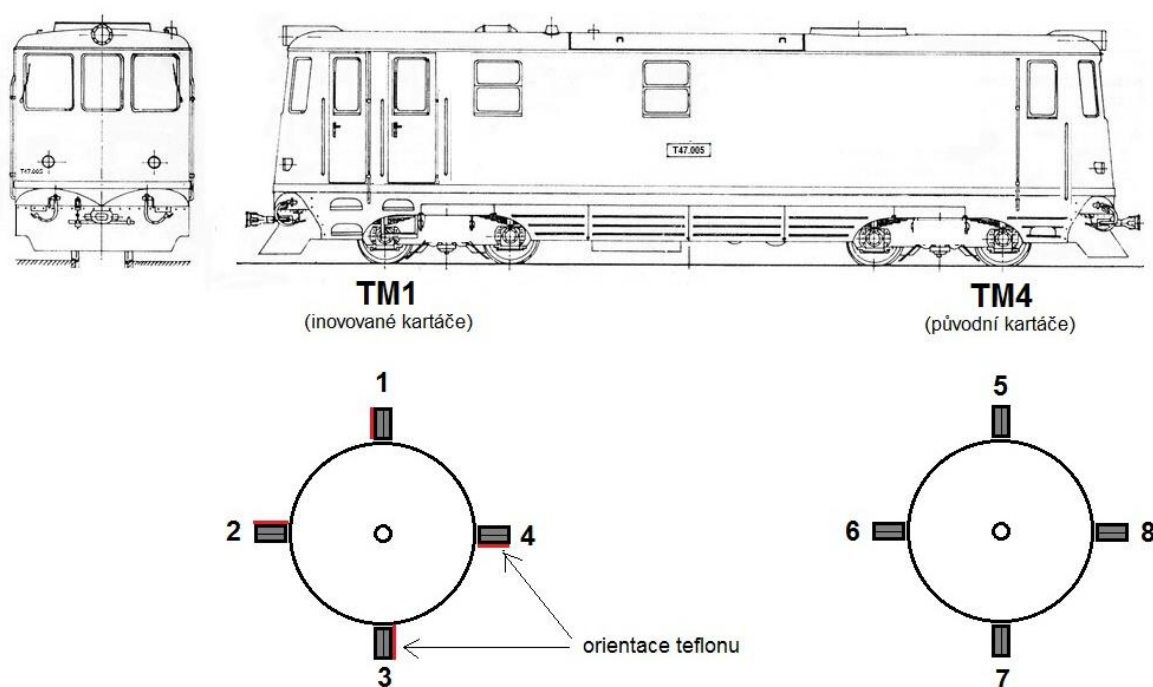


Рисунок 5 – Расположение двигателей локомотива, установка щеток и ориентация тефлона



Рисунок 6 – Сравнение оригинальной и обновленной щетки EG680

Оба испытуемых двигателя эксплуатировались в штатном режиме и регулярно проверялись, с осуществлением замера изменения высоты всех щеток. Суммарный пробег локомотива испытаний составил порядка 30 000 км, что соответствует примерно 8 месяцам эксплуатации.

Таблица 2

Изменение высоты щетки

Пробег	Км	ТМ 1 (Тефлон)				ТМ 4 (Оригинальный)			
		1	2	3	4	5	6	7	8
687405	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
692076	4671	0,55	1,00	0,50	0,75	1,95	2,45	0,80	0,70
693419	6014	0,85	1,45	0,67	1,00	2,45	3,45	0,95	1,10
695726	8321	1,10	1,85	0,85	1,35	3,40	4,85	1,50	1,50
697661	10256	1,35	2,15	1,05	1,65	4,15	5,90	1,90	1,80
721085	33680	4,40	7,20	3,55	5,50	11,80	16,50	5,40	5,10
Итого :		20,65				38,8			

Измерения показывают значительную разницу в степени износа щеток тягового двигателя ТМ4 и ТМ1, то есть между оригинальными и новыми щетками. Инновационные щетки демонстрируют значительно меньший износ за тот же пробег, чем необработанные щетки. Это утверждение применимо ко всем тефлоновым щеткам, кроме щетки №2, которая изнашивается немного быстрее, чем некоторые оригинальные кисти. Разница в удельном изменении высоты щетки в некоторых случаях весьма заметна, о чем свидетельствует

сравнение щеток №3 (обновленная) и №6 (оригинальная), которые различаются более чем в пять раз по степени износа. Информация о среднем износе щеток обоих типов была использована для определения теоретического срока службы щеток, рисунок 7.

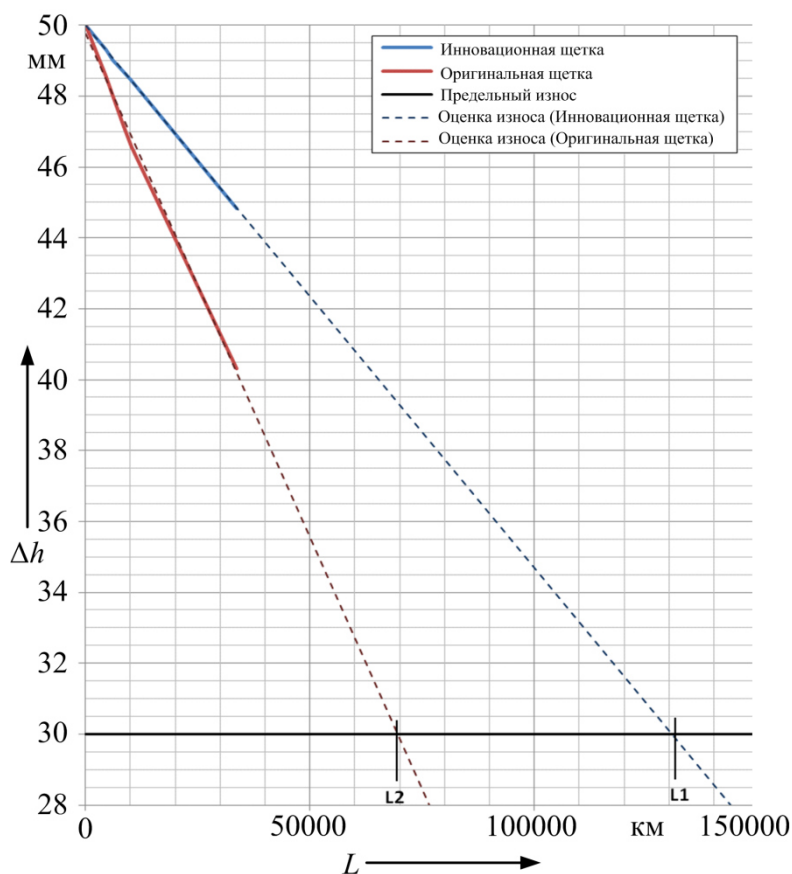


Рисунок 7 – Ожидаемый средний срока службы новой (L_1) и оригинальной (L_2) щеток для тягового двигателя ТМ35/15х4

3.2 Измерение силы нажатия щеткодержателей

Одним из решающих параметров, влияющих на скорость износа щеток, является усилие нажатия пружины щеткодержателей. Поскольку работа локомотива, на котором проводился эксперимент, не позволяла использовать более длительное время простоя для разборки, измерения и повторной сборки кронштейнов, используемых на обоих исследуемых тяговых двигателях, оценка нажатия была исследована на щеткодержателях одного типа, в том числе неиспользуемых.

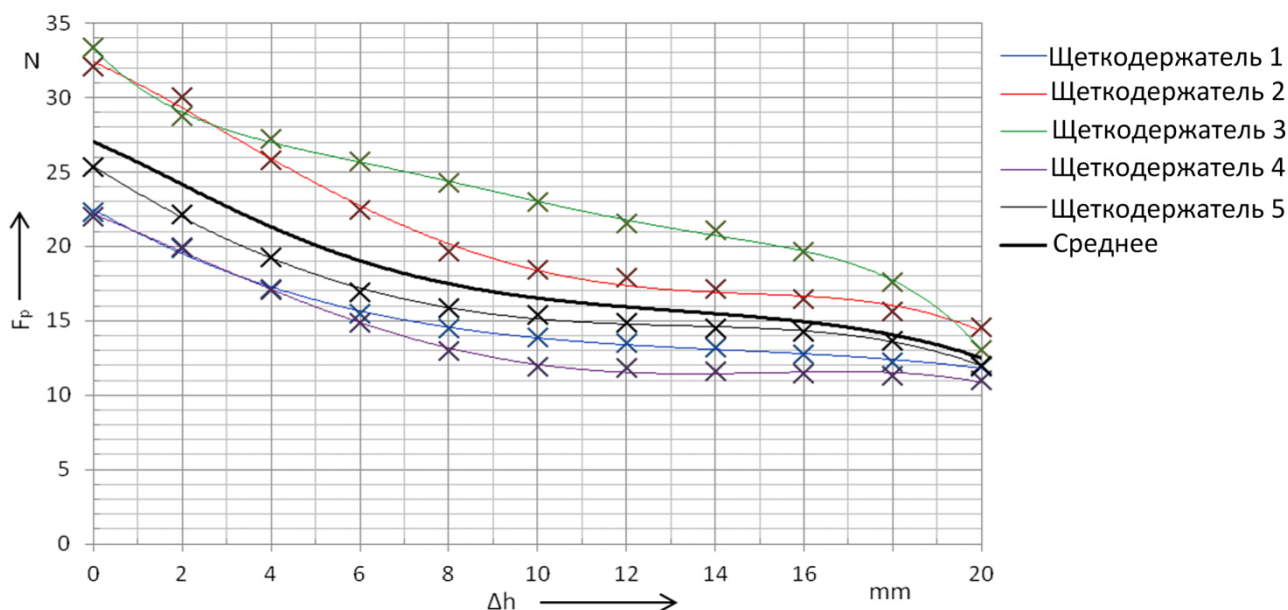


Рисунок 8 – Зависимость силы нажатия щеткодержателя от изменения высоты щетки

Из рисунка 8 видно, что сила нажатия щеткодержателей существенно меняется в зависимости от степени износа щетки. На новую щетку действует наибольшая сила (в среднем 26 Н), с последующей потерей сила давления уменьшается – в конце срока службы щетки (высота щетки = 30 мм) сила давления винтовой пружины всегда составляет примерно половину от исходного состояния (примерно 13 Н). Также очевидно, что нет двух одинаковых держателей по давлению - разница в силе часто достигает 100%. Объяснение этому можно найти не только в общем возрасте устройства (у некоторых щеткодержателей был год выпуска 1958), но и в том, что в условиях эксплуатации двигателей ТМ35/15х4 не предъявлялись требования к измерению и обслуживанию этих пружин. Однако на практике разные величины прижимающих сил отдельных щеток существенно влияют на скорость их износа.

3.3. Исследование износа электрической щетки

Во время длительных испытаний тяговых двигателей для измерений был использован метод гранулометрического анализа пылевидных продуктов износа электрических щеток. Однако по сравнению с двигателями небольших бытовых приборов применение этого метода для тяговых двигателей намного сложнее. Во время работы тяговый двигатель герметизируется от попадания

внешней грязи, устанавливается на труднодоступное шасси под локомотивом и движется вместе с ним по колее. Поэтому применение измерительной системы для метода пылевых частиц, состоящей из всасывающей трубы, измерительного цилиндра и самого пылесоса, практически невозможно во время движения локомотива. В данных условиях был предложен некий компромисс в виде взятия пробы пылевых частиц износа на отключенном тяговом двигателе в испытательном помещении. Однако в ходе эксперимента с локомотивом Т47.005 отключить и установить оба измеренных тяговых двигателя не удалось по временным и эксплуатационным причинам. В связи с этим была реализована уникальная процедура, благодаря которой стало возможным извлекать частицы пыли из инкриминируемых двигателей без необходимости их разборки и связанных с этим длительных простоев.

Измерения проводились в депо Йиндржихув Градец. Отслеживаемый локомотив был поставлен на рельсы, оборудованные смотровым каналом, сразу после прибытия поезда 21211. Колесная пара с измеренным тяговым двигателем (сначала ТМ1, затем ТМ4) поднималась с помощью двух гидравлических домкратов (каждый грузоподъемностью 30 т) примерно на 20 мм над головками рельсов, чтобы колеса могли свободно вращаться над колеей. Условия заключались в том, чтобы обезопасить локомотив от откатывания, подложить под корпуса подшипников, демонтировать датчики защиты от скольжения и отклонить горловины труб песочницы. С тягового двигателя сняли крышку коллектора. В канал помещали пылесос с измерительным устройством, соединенным с всасывающим шлангом с плоским соплом той же ширины, что и щетка. Конец этой насадки прочно прикреплялся как можно ближе к передней кромке исследуемой щетки. Впоследствии локомотив был запущен, а неизмеряемые тяговые двигатели были выключены. После стабилизации скорости оси на установленной 2-й передаче пылесос частично очищал зону коллектора, а затем в течение примерно 20 минут начинался сбор частиц пыли, так что захваченный образец в обоих измерениях соответствовал примерно одинаковому пройденному расстоянию.

$$l = t_m \cdot n \cdot \frac{d \cdot \pi}{10^6}, \quad (1)$$

где l - теоретическое пройденное расстояние [км];

t_m - время измерения [мин];

n - установившееся количество оборотов [об/мин];
 d - диаметр ступени колеса [мм], ($d = 760$ мм).

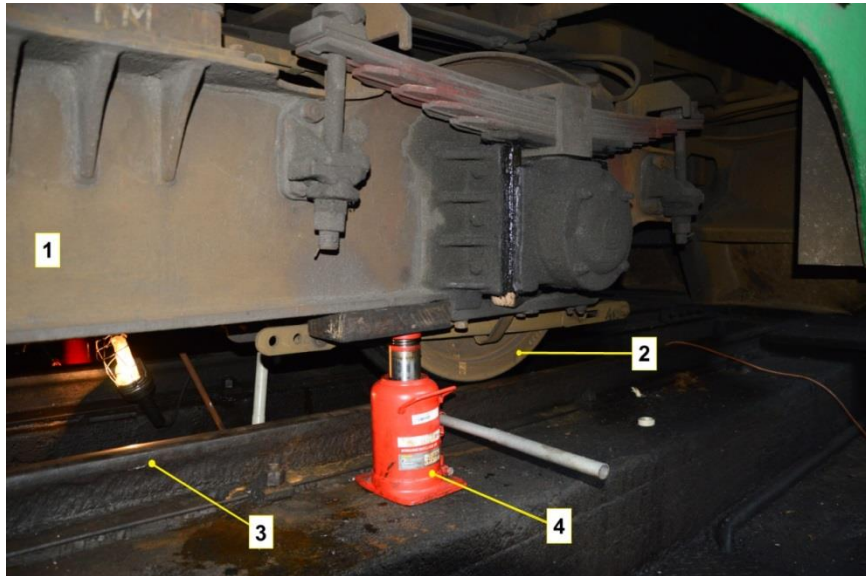


Рисунок 9 – Подъем измеряемой оси с помощью гидравлических домкратов

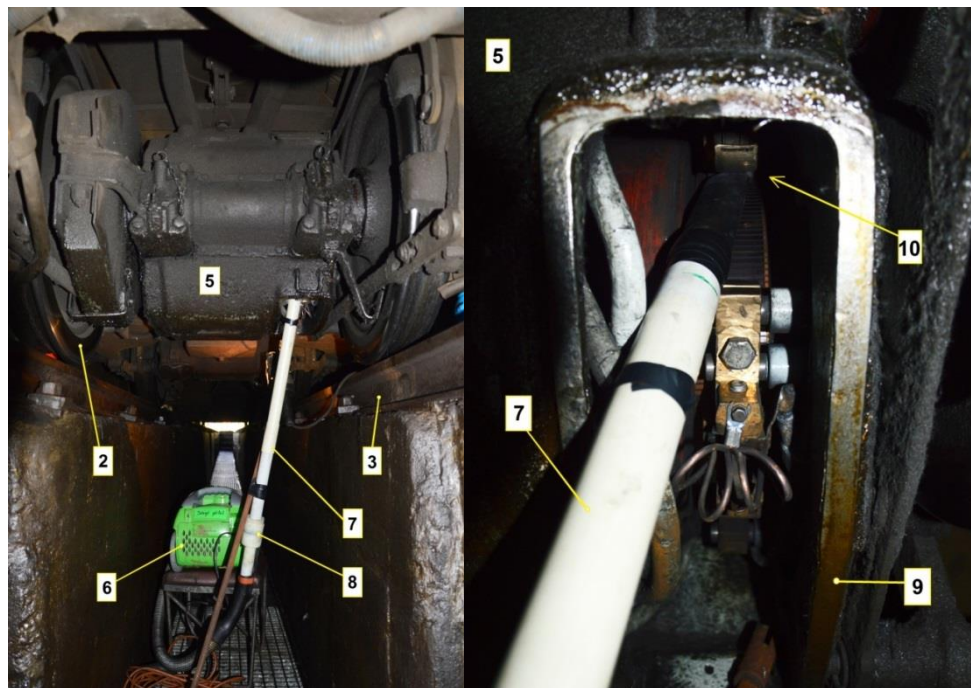


Рисунок 10 – Крепление всасывающего шланга с мерным цилиндром
 ПОД ЛОКОМОТИВОМ:

1 – рама шасси, 2 – измеряемая ось колеса, 3 – направляющие, 4 – домкрат,
 5 – тяговый двигатель, 6 – пылесос, 7 – всасывающий шланг, 8 – мерный цилиндр,
 9 – открытая уплотнительная крышка, 10 – мерная щетка

Уместно отметить, что при подготовке данной работы был обнаружен ограниченный срок службы образца частиц износа, попавших на предметные стекла. Также касторовое масло имеет тенденцию через определенное время (в порядке суток) сливаться в капли, что существенно нарушает исходную симметрию распределения частиц. Из-за движения масла частицы износа агломерируются и перекрываются, что значительно ухудшает качество оценки. В связи с тем, что захват продуктов износа из тяговых двигателей происходил в Йиндржихув-Градец, находящемся в 130 км от Брно, эти испытания необходимо было адаптировать к логистическим возможностям, чтобы обеспечить быструю доставку образцов на факультет для сканирования под микроскопом. Другой опасностью порчи образцов является возможность опрокидывания или слива части масляного слоя с частицами за пределы стекла из-за длительного наклона при их хранении или транспортировке.

Образцы частиц пыли оценивали в цифровом виде с использованием кода, созданного в программе Matlab. VMPČ сравнивает объемы щеточных потерь, полученные методом гранулометрического анализа, с теоретически рассчитанными объемами V_{kTM} , приведенными в таблице 4. Теоретическая потеря объема материала щетки тягового двигателя основана на расчетах, полученных на основе ее геометрических размеров, и на длительных испытаниях, которые всегда пересчитываются для данной щетки на расстояние 12,8 км.

Таблица 3

Параметры тягового двигателя при испытании

Тяговый двигатель	Щётка	U , В	I , А	n , об/мин	V , км/ч	t_m , мин	l , км
ТМ1	№2 (инновационный)	277	14	244	35	22	12,8

Произведем расчет площади поверхности щетки EG680:

$$S_{EG680} = 40 \cdot 16 - 4 \cdot \frac{2^2}{2} = 632 \text{ мм}^2. \quad (2)$$

Объем продуктов износа щетки №2 после пробега 12,8 км:

$$V_{2_{kTM}} = S_{EG680} \cdot h_{2_{10256km}} \cdot \frac{12,8}{10256} = 632 \cdot 2,15 \cdot \frac{12,8}{10256} = 1,695 \text{ мм}^3. \quad (3)$$

Изменение высоты щетки № 2 после пробега 12,8 км:

$$h_{2\_кТМ} = h_{2\_10256км} \cdot \frac{12,8}{10256} = 2,15 \cdot \frac{12,8}{10256} = 0,00268 \text{ мм.} \quad (4)$$

Параметр δ [%] представляет собой отношение теоретического объемного износа щетки, определенного методом гранулометрического анализа, и объема, рассчитанного в результате испытаний (2-4).

$$\delta = \frac{100 \cdot V_{МРС}}{V_{кТМ}} = \frac{100 \cdot h_{МРС}}{h_{кТМ}} [\%] \quad (5)$$

Таблица 4

Значения объема износа и изменения высоты щетки

Тяговый двигатель	Щетки	$V_{МРС},$ мм ³	$V_{кТМ},$ мм ³	$h_{МРС},$ мм	$h_{кТМ},$ мм	$\delta,$ %
ТМ1	№2 (инновационный)	0,100	1,695	0,16	2,68	5,92

4. Частичная оценка испытаний двигателей ТМ35/15х4.

В ходе эксперимента были проверены и подтверждены теоретические знания и возможности инновационного скользящего контакта на электрических машинах большой мощности, эксплуатирующихся в сложных условиях. Длительные испытания тяговых двигателей локомотива показали, что даже в случае 50%-ного обновления скользящего контакта, срок службы электрических щеток, с нанесенным слоем тефлона, увеличился примерно на 90% по сравнению с оригинальными щетками. Оригинальные щетки подлежат замене примерно через 70000 км пробега, а обновленные щетки выдерживают средний пробег локомотива 130000 км (рисунок 7, точки L1 и L2). Эффект от предложенных решений для скользящего контакта наглядно представлен суммой перепадов высоты всех щеток в пределах одной машины, которая показывает более чем двукратную разницу в общем износе между оригинальными щетками ($\sum \Delta h = 38,8$ мм) и тефлоновыми щетками ($\sum \Delta h = 20,65$ мм).

В рамках исследований была предпринята попытка экспериментально проверить возможность использования метода гранулометрического анализа пылевидных продуктов износа тяговых электродвигателей в сложных рабочих условиях без необходимости разборки и выкатки машины. В связи с тем, что степень износа этих двигателей оценивалась по пробегу локомотива, а не по

времени работы, время удаления пыли из пространства скользящего контакта пришлось адаптировать к немного разным установившимся скоростям ротора. Сравнение полученных результатов, к примеру, с испытаниями двигателями небольших пылесосов, показывает что был получен сопоставимый процент выпущенных частиц износа (около 5%), что не позволяет полностью точно оценить срок службы щетки, но общая оценка образцов подтверждает аналогичные выводы о различиях в износе обеих исследованных щеток (с тефлоном и без) с результатами многолетнего тестирования. Также основной проблемой при применении метода гранулометрического анализа при испытаниях тяговых двигателей, были ухудшенные условия труда, представленные очень запыленной средой.

5. Заключение

На основании достигнутых результатов можно оценить и рекомендовать указанную технологию нововведения в конструкции электрических щеток «sT» как наиболее подходящую для активного практического использования в тяговом режиме. Результаты показывают, что срок службы обновленных щеток конструкции «sT» и всего скользящего контакта в несколько раз больше, чем у щеток стандартных типов. Это также продлевает срок службы скользящего контакта в целом и снижает не только эксплуатационные расходы, но также экономическую сложность и общее техническое обслуживание локомотивных операций.

Благодарность:

Эта исследовательская работа также проводилась в Центре исследований и использования возобновляемых источников энергии (CVVOZE). Автор благодарит финансовую поддержку Министерства образования, молодежи и спорта Чешской Республики в рамках институциональной поддержки и Технологического агентства Чешской Республики в рамках программы Национального центра компетенций (проект № TN01000071 Национальный центр компетенций в области мехатроники и интеллектуальных технологий для машиностроения). Авторы также благодарят руководство узкоколейной железной дороги JHMD в Й. Градец за возможность проведения этих долгосрочных испытаний.

Список литературы

1. Chmelik, K. Kluzny kontakt v elektrických strojích / K. Chmelik, F. Veselka. – Ostrava : KEY Publishing s. r. o., 2007. – 256 p. – Text : unmediated.
2. PÍŠALA, J. Vliv prachových částic na kluzný kontakt. Effect of dust particles on sliding electrical contact / J. Píšala. – Brno, 2019. – 74 p. – URL: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119712>. – Text : electronic.
3. Veselka F. Inovace měřících, diagnostických metod a konstrukce ss strojů. Innovation of measuring, diagnostic methods and construction of DC machines / M. Horná., F. Veselka. – Brno : EPVE 2002, 12.-13.11. 2002. – ISBN 80-214-2246-7. – Text : unmediated.
4. Забоин, В. Н. Гранулометрический анализ пылевидных продуктов износа электрических щеток / В. Н. Забоин, Ф. Веселка. – Текст : непосредственный // Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии : материалы девятой международной научно-технической конференции / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск: ОмГУПС, 2013. – С. 67-76.
5. Fojtík, V. Příspěvek ke studiu mechanických vlastností sběracího ústrojí. Contribution to the study of mechanical properties of the collecting device / V. Fojtík. – Text : unmediated. // TES VÚES Brno. – 1975. – č.1.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Веселка Франтишек

Технический университет г. Брно
Technická 3082/12, Královo Pole, 61600,
Brno, Česká republika.
Доцент, инженер кафедры «Энергетика и
электроника».
Тел.: +(420)-54114-6722.
E-mail: veselka@feec.vutbr.cz.

Ян Пишала

Пригородные железные дороги
Йиндржихув-Градец.
Nádražní, 203/II, 37701, Jindřichův Hradec,
Česká republika.
Тел.: +(420)-384-361-165.
E-mail: spilas@volny.cz.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Veselka František

Vysoké učení technické v Brně.
Technická 3082/12, Královo Pole, 61600,
Brno, Česká republika.
Doc.–Ing., Ústav výkonové elektrotechniky a
elektroniky, Fakulta elektrotechniky a
komunikačních technologií.
Phone: +(420)-54114-6722.
E-mail: veselka@feec.vutbr.cz.

Jan Píšala

Jindřichohradecké místní dráhy
Nádražní, 203/II, 37701, Jindřichův Hradec,
Česká republika
Phone: +(420)-384-361-165.
E-mail: spilas@volny.cz.

Забойн Валерий Николаевич
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого.
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург,
195251, Россия.
Doctor in Technical Sciences, professor.
E-mail: zabv@rambler.ru.

Zaboyn Valery Nikolaevich
Saint-Petersburg Polytechnic University.
Polytechnicheskaya, 29, St.Petersburg,
195251, the Russian Federation.
Doctor in Technical Sciences, professor.
E-mail: zabv@rambler.ru.

УДК 621.313.33:621.314.57

В. В. Харламов, Д. И. Попов, Г. Г. Ахмедзянов
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
г. Омск, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМОЙ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ И ВЫРАБАТЫВАЕМОЙ НАГРУЗОЧНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ В СХЕМЕ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

В статье рассмотрена известная схема для определения мощности, потребляемой асинхронным двигателем и вырабатываемой нагрузочным генератором в схеме взаимной нагрузки. Отмечены недостатки известной схемы. Предложено видоизменить известную схему с целью повышения ее эксплуатационных качеств. Даны рекомендации применения способа определения мощностей на входах асинхронных машин, реализуемого посредством предложенной схемы, при техническом обслуживании подвижного состава железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: техническое обслуживание, эксплуатация, асинхронный двигатель, испытательные комплексы, взаимная нагрузка.

Viktor V. Kharlamov, Denis I. Popov, Gajaz G. Akhmedzjanov
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

DETERMINATION OF THE POWER OF INDUCTION MOTOR AND LOAD GENERATOR IN THE MUTUAL LOAD SCHEME

The article considers a well-known scheme for determining the power consumed by an induction motor and generated by a load generator in a mutual load scheme. The disadvantages of the known scheme are noted. It is proposed to modify the known scheme in order to improve its

performance. Recommendations are given for the application of the method for determining the capacity at the inputs of induction machines, implemented using the proposed scheme, in the maintenance of railway rolling stock.

Keywords: maintenance, operation, asynchronous motor, test complexes, mutual load.

В процессе эксплуатации асинхронных электродвигателей требуется проводить их испытания (при приемке, а также после ремонта), что требует выполнения измерений ряда параметров в соответствии с ГОСТ 11828-86, ГОСТ 2582-2013. Данными ГОСТами допускаются испытания асинхронных электродвигателей по методу взаимной нагрузки.

Внедрение на производстве электротехнического комплекса для испытаний асинхронных машин требует значительных капиталовложений. Следовательно, уменьшение себестоимости испытательного комплекса, его энергопотребления и сложности эксплуатации являются актуальным направлением научных разработок.

В схемах взаимной нагрузки асинхронных машин их питание осуществляют переменным напряжением, сформированным путем широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [1, 2]. При таком питании затрудняется измерение мощности, на входе асинхронных двигателей.

Как правило, в таких случаях применяются сложные измерительно-вычислительные устройства, специализированные для измерения мощности в электрических цепях с несинусоидальным напряжением [3, 4]. Наиболее обоснованным с точки зрения минимизации затрат на специфические измерительные приборы представляется способ определения мощности приведенный в источниках [5, 6]. Суть данного способа состоит в применении схемы, представленной на рисунке 1 и следующей последовательности действий.

На схеме обозначены следующие элементы: 1 – преобразователь частоты, в состав которого входят два управляемых выпрямителя-инвертора 1.1 и 1.3, между которыми находится звено постоянного тока 1.2, как правило, включающее конденсатор; 2 и 3 – контакторы (или автоматы) для подключения к сети; АМ1 и АМ2 – асинхронные машины, одна из которых (АМ1) выступает в качестве испытуемого двигателя, другая (АМ2) – в качестве нагрузочного генератора; 4 – 6 – измерители мощности (ваттметры). При этом измеритель

мощности 6 должен быть подходящим для измерений в цепях с несинусоидальным напряжением с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) с частотой в несколько килогерц.

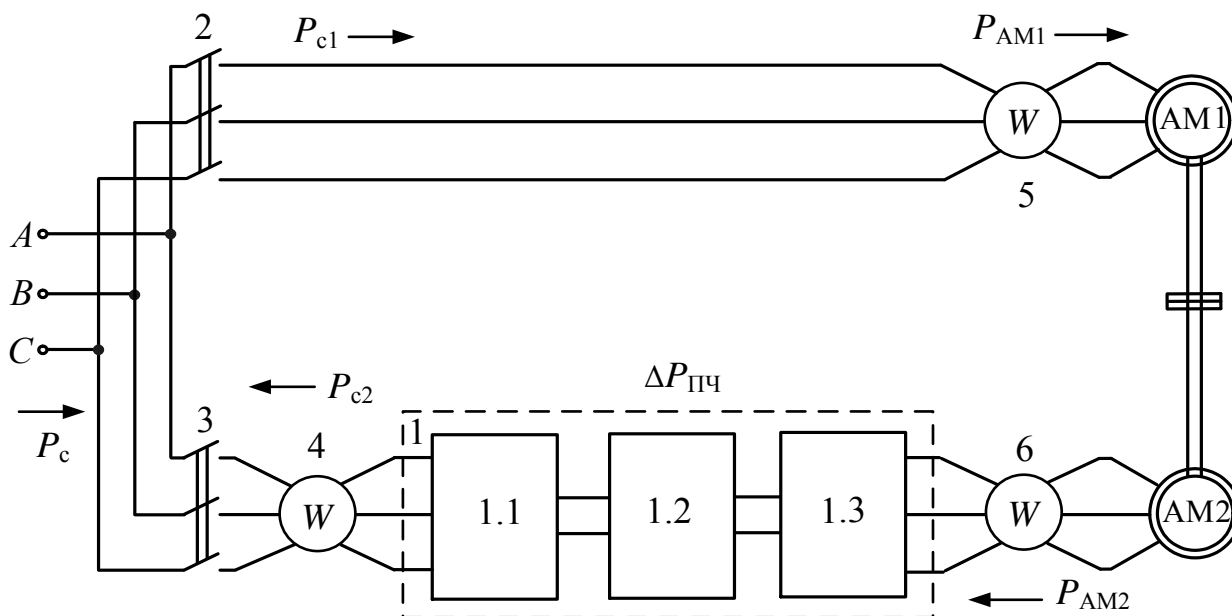


Рисунок 1 – Схема для определения мощностей потребляемых и вырабатываемых асинхронными машинами

На схеме (см. рисунок 1) указаны мощности, проходящие по ее участкам, и потери в преобразователе частоты (ПЧ). Мощности на участках схемы считают положительными, если их направление совпадает с направлением соответствующих стрелок.

Определение электрической мощности, потребляемой или вырабатываемой асинхронными машинами в процессе испытания, для принятой схемы (см. рисунок 1) необходимо проводить в два этапа.

На первом этапе проводятся следующие действия:

включается контактор 3, подавая питание на вход ПЧ;

осуществляется плавный запуск машины AM2 на холостом ходу до частоты напряжения сети;

включается контактор 2, подавая питание на машину AM1;

ступенчато уменьшается частота напряжения, питающего машину AM2, за счет чего AM2 нагружается в режиме генератора, а машина AM1 – в режиме двигателя;

далее на каждой из ступеней нагрузки машины АМ1 при установившемся режиме работы проводится ряд измерений и вычислений:

проводится измерение мощности приборами 4 – 6;

по измеренным значениям мощности определяют зависимость потерь в преобразователе частоты 1 от мощности, возвращаемой в сеть P_{c2} :

$$\Delta P_{ПЧ} = |P_{c2} - P_{AM2}|, \quad (1)$$

где P_{AM2} – измеренное значение мощности, вырабатываемой нагрузочным генератором АМ2;

P_{c1} – измеренное значение мощности, возвращаемой в сеть преобразователем частоты;

каждому из значений $\Delta P_{ПЧ}$ ставится в соответствие значение P_{c2} , в результате чего можем вывести зависимость $\Delta P_{ПЧ} = f(P_{c2})$.

Первый этап проводится только один раз для получения и дальнейшего многократного использования зависимости $\Delta P_{ПЧ} = f(P_{c2})$.

Второй этап проводится следующим образом.

Измеритель мощности 6 на данном этапе не требуется. При некотором установившемся режиме измеряются величины P_{AM1} и P_{c2} , после чего определяют потери в ПЧ по зависимости $\Delta P_{ПЧ} = f(P_{c2})$.

Мощность вырабатываемую машиной АМ2 можно определить по выражению:

$$P_{AM2} = P_{c2} + \Delta P_{ПЧ}. \quad (2)$$

Способ определения мощности, вырабатываемой машиной АМ2, в схеме испытаний с одним ПЧ может быть осуществлен с применением схемы, приведенной на рисунке 2.

Для данной схемы отличие на первом этапе определения потерь и мощностей заключается в следующем:

вместо определения потерь в ПЧ необходимо определить потери в выпрямителе-инверторе 1.3 по выражению:

$$\Delta P_{инв} = |P_{инв} - P_{AM2}|, \quad (3)$$

где $P_{инв}$ – мощность в звене постоянного тока ПЧ;

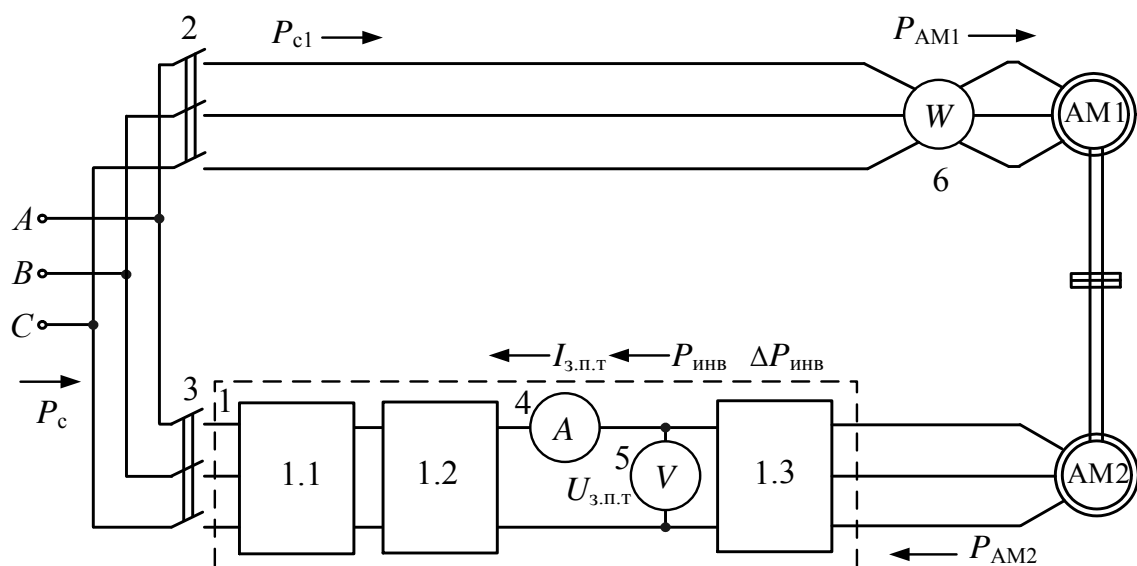


Рисунок 3 – Вид схемы испытания на втором этапе

С учетом тенденции внедрения на железнодорожном транспорте асинхронного тягового привода рекомендуется применение предложенного способа и схемы испытаний в процессе технического обслуживания железнодорожного подвижного состава.

Список литературы

1. Патент № 140678 Российская Федерация, МПК G01R 31/34 (2006.01) Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки : № 2013147519/28 : заявлено 24.10.2013 : опубликовано 20.05.2014 / В. Д. Авилов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов ; патентообладатель Омский государственный университет путей сообщения. – 2 с. : ил. – Текст : непосредственный.
2. Патент № 145998 Российская Федерация, МПК G01R 31/34(2006.01). Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки : № 2014112920/07 : заявлено 02.04.2014 : опубликовано 27.09.2014 / В. Д. Авилов, В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов ; патентообладатель Омский государственный университет путей сообщения. – 6 с. : ил. – Текст : непосредственный.
3. Патент № 2296338 Российская Федерация, МПК G01R19/10. Способ измерения активной мощности нагрузки в электрических цепях переменного тока : № 2005133352/28 : заявлено 28.10.2005 : опубликовано 27.03.2007 / Н. М. Алейников, А. Н. Алейников ; патентообладатель Воронежский государственный университет. – 5 с. : ил. – Текст : непосредственный.

4. Патент № 2229723 Российская Федерация, МПК G01R 21/06 (2000.01). G01R 21/133 (2000.01) Способ измерения активной мощности нагрузки в электрических цепях переменного тока : № 2002114571/28 : заявлено 03.06.2002 : опубликовано 27.05.2004 / В. Д. Михотин, В. И. Чернецов ; патентообладатель Пензенский государственный университет. – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.

5. Патент № 143346 Российская Федерация, МПК G01R 31/00 (2006.01). Схема для определения электрической мощности, потребляемой асинхронными двигателями при испытании их методом взаимной нагрузки : № 2014112918/28 : заявлено 02.04.2014 : опубликовано : 20.07.2014 / В. Д. Авилов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов ; патентообладатель Омский государственный университет путей сообщения. – 6 с. : ил. – Текст : непосредственный.

6. Авилов, В. Д. Методика определения потерь в двухзвенных преобразователях частоты в составе стенда для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки / В. Д. Авилов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2014. – № 1 (17). – С. 2-8.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Харламов Виктор Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27

E-mail: emoe@omgups.ru.

Попов Денис Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Kharlamov Victor Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Graduate student of the Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of department of «Electrical machines and general electrical engineering» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru.

Popov Denis Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of department of «Electrical machines and general electrical engineering» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27

E-mail: emoe@omgups.ru.

Ахмедзянов Гаяз Гумарович

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Автоматика и телемеханика» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: AhmedzyanovGG@omgups.ru.

Akhmedzjanov Gajaz Gumarovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of department of «
Automation and telemechanics» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: AhmedzyanovGG@omgups.ru.

УДК 621.313

А. С. Зуев

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ)

г. Москва, Российская Федерация

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В статье предлагается принципиально новый подход к конструированию и эксплуатации тягового подвижного состава. На примере асинхронного и коллекторного тяговых электродвигателей показано, как изменение конструкции, допускаемое возможностями эксплуатации, способно повысить энергоэффективность.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, тяговый подвижной состав, электровоз, тепловоз, электропоезд, расход электроэнергии, энергоэффективность.

Alexander S. Zuev

Scientific Research Institute of Railway Transport (VNIIZhT), Moscow, the Russian Federation

DESIGN OPTIMIZATION OF TRACTION ELECTRIC MOTORS

The article proposes a fundamentally new approach to the design and operation of traction rolling stock. By the example of asynchronous and collector traction motors, it is shown how a design change allowed by the operating capabilities can increase energy efficiency.

Keywords: traction motor, traction rolling stock, electric locomotive, diesel locomotive, electric train, power consumption, energy efficiency.

При решении задачи создания новых энергоэффективных тяговых электрических машин для железнодорожного транспорта важно найти оптимальное решение, которое без применения дорогостоящих технологий обеспечило бы положительный экономический эффект. Ключевым методом является комплексность подхода, сочетающего правильный выбор как конструкции, так и способа эксплуатации машины. Например, технике известны электрические машины, работа которых зависит от направления вращения. С другой стороны, особенностями работы железнодорожного подвижного состава являются развитие силы тяги в одном направлении движения в течение длительного времени, а также наличие возможности (и современной локальной практики) разворота локомотивов на треугольниках, поворотных кругах, ветвлениях железнодорожных линий. Последним способом возможен разворот электропоездов. Поэтому выглядит целесообразным поиск технического решения, улучшающего тягово-энергетические характеристики подвижного состава в преимущественном направлении тяги.

В ходе исследования разработаны асимметричные магнитные системы асинхронного и коллекторного тяговых двигателей (рисунок 1).

Оптимизация в технике представляет собой процесс максимизации выгодных характеристик. Оптимальное решение является более предпочтительным по отношению к другим.

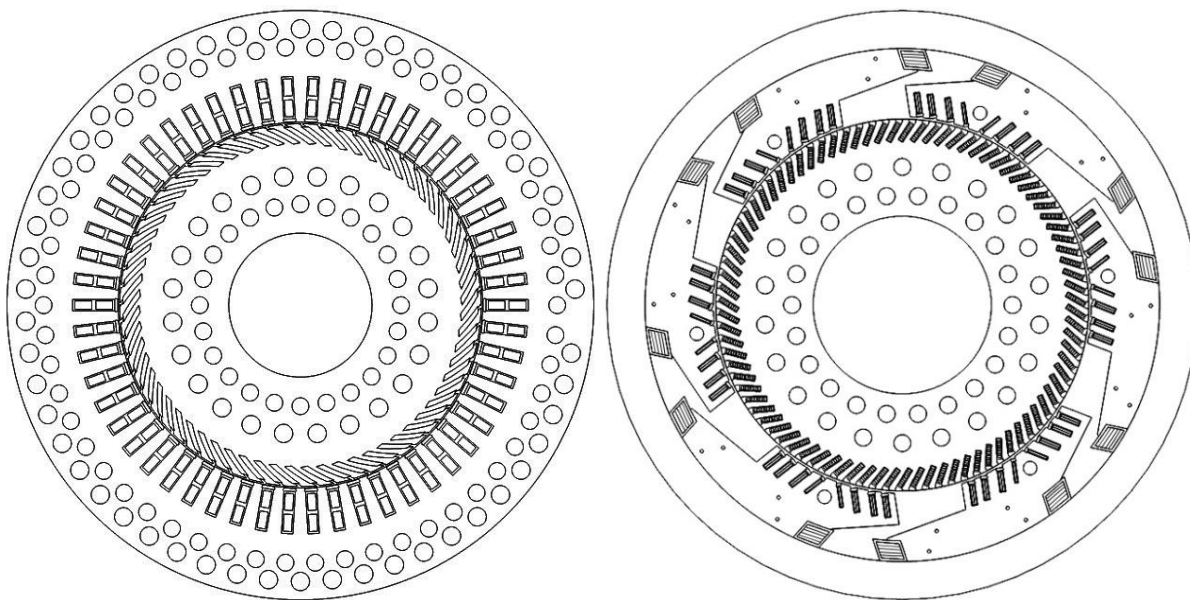


Рисунок 1 – Проекты асинхронного и коллекторного тяговых двигателей

В качестве критерия оптимизации в данном исследовании выбран максимум коэффициента полезного действия тягового электродвигателя в среднеэксплуатационном режиме его работы, характеризуемом определённым уровнем мощности и частоты вращения. В качестве варьируемых выбрано два параметра. Один из них характеризует конструкцию двигателя (угол наклона пазов ротора тягового электродвигателя). В качестве второго выбран параметр, отражающий схему эксплуатации тягового подвижного состава (число направлений движения: два или одно, предусматривающее разворот локомотива или электропоезда вблизи конечной станции или в депо или движение по кольцевому маршруту). Конструктивными ограничениями являются избежание подреза зубца ротора у его основания в результате наклона паза, а также необходимость создания определённой коммутационной электродвижущей силы в коллекторном электродвигателе. Математическая модель нелинейных электромагнитных и электромеханических процессов строится в результате компьютерного моделирования. В ходе исследования на компьютерной модели асинхронного электродвигателя рассчитаны коэффициенты полезного действия всевозможных вариантов сочетаний значений конструктивного параметра и схем эксплуатации (таблица 1). Жирной рамкой в таблице отмечено максимальное значение коэффициента полезного действия асинхронного электродвигателя в среднеэксплуатационном режиме работы, составляющее 0,972 и достигаемое при схеме эксплуатации с разворотом или кольцевым маршрутом и форме пазов ротора с углами наклона 55° в части со стороны зазора, $51,5^\circ$ в середине и 48° у дна паза (48° по конструктивному ограничению, $51,5^\circ$ как среднее значение между углами наклона в верхней и нижней части паза).

Таблица 1

Двухмерная оптимизация преобразования энергии в асинхронном тяговом электродвигателе в среднеэксплуатационном режиме

		Угол наклона части паза ротора со стороны зазора					
		– 61	– 55	0	55	61	
Число направлений движения	1	0,960	0,961	0,948	0,972	0,971	КПД
	2	0,965	0,966	0,948	0,966	0,965	

Таким образом, в результате многовариантных расчётов метод полного перебора успешно привёл к решению сложной нелинейной задачи.

Какие характеристики могут быть улучшены? Возможно снижение потерь электроэнергии в тяговых электродвигателях, повышение мощности тяговых электродвигателей, улучшение токосъёма на высоких скоростях за счёт снижения потребляемого тока, упрощение системы охлаждения двигателей, снижение стоимости тягового преобразователя за счёт возможности потребления двигателем электроэнергии более низкого качества без его перегрева.

В ходе работы над проектом было принято решение исследовать наличие энергосберегающих свойств у короткозамкнутого ротора асинхронного электродвигателя с наклонными пазами, подобными представленным в [1]. Пазы наклонены в тангенциальном направлении в плоскости, перпендикулярной оси машины. Предлагаемая конструкция представлена на рисунке 1 слева. За основу был взят тяговый двигатель ДТА-1200А скоростного пассажирского электровоза ЭП20, основные размеры и характеристики которого приведены в [2]. Была построена двухмерная компьютерная модель двигателя, позволяющая получить значения развиваемого вращающего момента и потерь в двигателе на основе моделирования магнитного поля методом конечных элементов.

С целью учёта специфики работы железнодорожного транспорта при расчёте коэффициента полезного действия моделирование выполнено не только в номинальном, но и в среднеэксплуатационном режиме работы тяговых двигателей электровозов, что сводилось к расчёту дополнительной точки характеристики с более низкой мощностью и несколько отличающейся от номинальной частотой вращения.

В среднеэксплуатационном режиме смоделированы двигатель традиционной конструкции и двигатель с инновационным ротором с наклонными пазами. Результаты расчётов приведены в таблица 2. Проведенные расчеты при неизменном вращающем моменте показали возможность снижения потерь в электрической машине и повышения её коэффициента полезного действия. Как видно из таблицы, короткозамкнутый ротор с наклонными пазами значительно снижает потери энергии в тяговом асинхронном электродвигателе: в 1,15 раза в продолжительном и в 1,82 раза в

среднеэксплуатационном режиме.

Анализ смоделированного магнитного поля выявил увеличение угла наклона поля в воздушном зазоре, что объясняет улучшение электромеханического взаимодействия ротора и статора.

Таблица 2

Результаты расчёта потерь энергии и коэффициентов полезного действия существующего и инновационного асинхронных тяговых электродвигателей в номинальном (продолжительном) и среднеэксплуатационном режимах работы

Ток статора, А	Мощность, кВт	Форма пазов ротора	Частота питания, Гц	Абсолютная частота скольжения, Гц	Частота вращения, об/мин	Мощность потерь, кВт	КПД	Соотношение потерь
360	1103	Прямые	89,00	0,69	1766	39,2	0,964	1,15
395	1099	Наклонные				34,2	0,969	
145	185	Прямые	77,12	0,12	1540	9,6	0,948	1,82
119	185	Наклонные				5,3	0,972	

Дополнительно была разработана магнитная система асимметричного коллекторного двигателя (рисунок 1, справа), которая характеризуется уменьшенным числом обмоток на осто́ве, асимметричной формой главных полюсов, наклоном зубцов якоря.

В основу расчётной модели исходного варианта легла конструкция тягового электродвигателя НБ-514 электровазов ВЛ85 [3] и 2ЭС5К.

При выборе геометрических размеров учитывалась необходимость обеспечения процесса коммутации путём поддержания необходимого уровня коммутирующей электродвижущей силы (ЭДС), наводимой в замкнутых щёткой секциях обмотки якоря. Для рассматриваемой схемы эксплуатации при применении асимметричных конструкций якоря и главных полюсов удалось обеспечить коммутацию без применения добавочных полюсов. При сниженном якорном токе возможно снижение коммутирующей ЭДС.

Компьютерное моделирование показало возможность снижения потерь в коллекторной электрической машине при движении вперёд в 1,83 раза в номинальном режиме и в 1,64 раза в среднеэксплуатационном режиме (таблица 3).

Таблица 3

Результаты расчёта потерь энергии и коэффициентов полезного действия существующего и инновационного коллекторных тяговых электродвигателей в номинальном (продолжительном) и среднеэксплуатационном режимах работы

Ток, А	Мощность двигателя, кВт	Форма магнитной системы	Сумма коммутационных ЭДС в секциях, замкнутых одной щёткой, В	Частота вращения, об/мин	Мощность потерь, кВт	КПД	Соотношение потерь при соизмеримой мощности
843	713	Симметричная	1,585	925	52,0	0,93	1,83
843	1038	Асимметричная	1,593		42,1	0,96	
667	716	Асимметричная	1,167		28,4	0,96	
407	209	Симметричная	1,144	898	16,9	0,92	1,64
366	210	Асимметричная	0,546		10,5	0,95	

На новом тяговом подвижном составе помимо инновационных двигателей предполагается применить редукторы с асимметричным зубчатым зацеплением, асимметричные подшипники и особую систему забора охлаждающего воздуха, ориентированную на набегающий воздушный поток.

Список литературы

1. Сергеев, П.С. Проектирование электрических машин / П. С. Сергеев, Н. В. Виноградов, Ф. А. Горяинов. – Изд. 3-е, переработ. и доп. – Москва : Энергия, 1970. – 632 с. – Текст : непосредственный.
2. Захаров, В. И. Параметры, характеристики и конструктивные особенности асинхронного тягового двигателя ДТА-1200А электровоза ЭП20 / В. И. Захаров. – Текст : непосредственный // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2009. – №2. – С. 55-66.
3. Тушканов, Б. А. Электровоз ВЛ85 : Руководство по эксплуатации / Б. А. Тушканов, Н. Г. Пушкарёв, Л. А. Позднякова. – Москва : Транспорт, 1992. – 480 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Зуев Александр Сергеевич

АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ВНИИЖТ).

Ул. 3-я Мытищинская, д. 10, г. Москва, 129626, Российская Федерация.

Научный сотрудник, аспирант РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 495 602 83 33 доб. 3-42-19.

E-mail: aleksandr-zuev-1987@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zuev Alexander Sergeevich

JSC "Research Institute of Railway Transport "(VNIIZhT).

3rd Mytishchinskaya st., 10, Moscow, 129626, the Russian Federation.

Researcher, post-graduate student of RUT (MIIT).

Phone: +7 495 602 83 33 ext. 3-42-19.

E-mail: aleksandr-zuev-1987@mail.ru

УДК 697.245.38

Д. Б. Рожицкий¹, А. А. Рыбак², А. Ю. Новиков¹

¹Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ)), г. Москва, Российская федерация,

²Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»), г. Москва, Российская Федерация

К ВОПРОСУ ОРГАНИЗАЦИИ ОТОПЛЕНИЯ СЛУЖЕБНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ К ПОДДЕРЖАНИЮ ЗНАЧЕНИЙ ВНУТРЕННЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗОНАХ

В статье рассматриваются преимущества и недостатки существующих и альтернативных систем отопления производственных зданий, обеспечивающих зональное поддержание комфортных условий внутри помещения, в зависимости от заданных значений температуры. Рассмотрены принцип работы и типовые схемы водяного, воздушного и инфракрасного систем отопления. Выполнена консолидация недостатков и преимуществ различных способов организации отопления.

Ключевые слова: Отопление производственных помещений, температур воздуха внутри помещений, водяное отопление, воздушное отопление, инфракрасное отопление.

Dmitry B. Rozhitsky¹, Alexey A. Rybak², Anton Yu. Novikov¹

¹Russian University of Transport (RUT(MIIT)), Moscow, the Russian Federation,

²All-Russian research Institute of railway transport (JSC "VNIIZHT"),
Moscow, the Russian Federation

ON THE ISSUE OF ORGANIZATION OF HEATING OF OFFICE PREMISES WITH DIFFERENT REQUIREMENTS FOR MAINTAINING INTERNAL TEMPERATURE VALUES IN PRODUCTION AREAS

The article discusses the advantages and disadvantages of existing and alternative heating systems for industrial buildings that provide zonal maintenance of comfortable indoor conditions, depending on the set temperature values. The principle of operation and typical schemes of water, air and infrared heating systems are considered. Consolidation of disadvantages and advantages of various ways of organizing heating is performed.

Keyword: Heating of industrial premises, indoor air temperature, water heating, air heating, infrared heating.

Оптимизация потребления топливно-энергетических ресурсов является одной из приоритетных задач для промышленности и экономики страны. Не исключением являются и предприятия железнодорожного транспорта. Более 80% тепловой энергии, вырабатываемой котельными ОАО «РЖД», расходуется на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение объектов. [1]. При этом основная задача систем отопления и вентиляции обеспечить комфортные условия для длительного нахождения персонала внутри этих помещений [2].

На крупных предприятиях с площадями в несколько тысяч квадратных метров рабочие зоны, зачастую, располагаются на площадях в 4-5 квадратных метра. При этом приходится отапливать весь объем помещения, включая тот в котором персонал отсутствует. Это приводит к огромным потерям тепловой энергии, что экономически нецелесообразно.

В качестве примера предлагаем рассмотреть главный механосборочный цех Новосибирского стрелочного завода (изготавливает стрелочные переводы железнодорожных путей) площадью более 34 тыс. м² при высоте здания около 16 м [3]. В помещении работает в смену несколько десятков человек – операторы разнообразных станков и механизмов. В зоне, который обслуживает рельсогибочный станок, требуется поддерживать комфортную температуру в интервале 16 – 18°C. Для оставшейся площади помещения (это примерно 1/3) занимаемой самим станком вполне достаточно 5 – 10 °C.

Целесообразна разработка специальных инженерных решений, направленных на эффективное использование топливно-энергетических ресурсов, затрачиваемых на обеспечение отопления производственных помещений, особенно в условиях различных требований к его параметрам. Одним из таких решений является организация зонального отопления.

Видов отопительных систем существует несколько. В основном они отличаются местом расположения нагревательного оборудования и видом теплоносителя. В зданиях различного назначения и использования применяют системы парового, водяного и воздушного отопления.

В настоящее время система парового отопления используется крайне редко, вследствие отсутствия регулировки температуры перегрева радиаторов и малого срока службы используемого оборудования. Данный вид отопления изначально экономически нецелесообразен

В водяной системе отопления в качестве теплоносителя используется вода или антифриз на водяной основе. Передача теплоты в помещение осуществляется посредством радиаторов, конвекторов, регистров из гладких труб. Данный вид отопления наиболее распространен ввиду преобладания централизованного теплоснабжения от ТЭЦ (теплоэлектроцентраль) или других аналогичных теплоисточников (районные и квартальные котельные и т.п.).

Системы водяного отопления разделяют:

по способу циркуляции воды – на системы с естественной (рисунок 1) и принудительной циркуляцией (рисунок 2);

по схеме обустройства отопительных стояков – на однотрубные (рисунок 3а, б) и двухтрубные системы (рисунок 4 а, б, в);

по способу прокладки магистральных трубопроводов горячей воды – на системы с верхней разводкой (прокладкой) магистралей и системы с нижней разводкой;

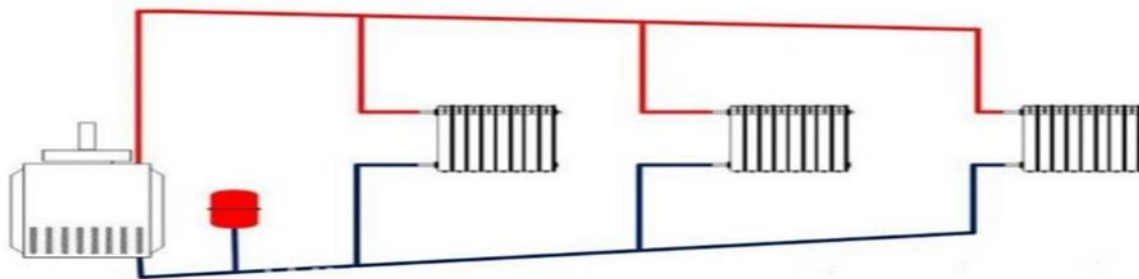


Рисунок 1 – Пример схемы отопления с естественной циркуляцией воды

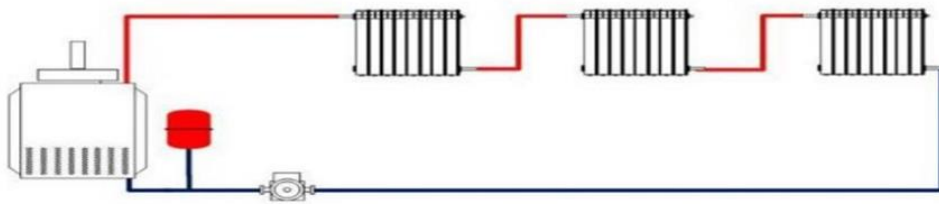


Рисунок 2 – Пример схемы отопления с принудительной циркуляцией воды

по конструкции магистральных трубопроводов горячей воды – с попутным движением (рисунок 4а) и тупиковые (рисунок 4б);

по конструктивному размещению стояков – на системы с вертикальным (рисунок 3, б и 4, в) и горизонтальным расположением стояков (рисунок 3, а и 4а, б) [4].

Рассмотрев особенности систем водяного отопления можно сделать вывод о целесообразности ее использования в жилых и административных зданиях, а также цехах малой площади.

В большинстве производственных зданий, имеющих значительные площади и высоту невозможно обеспечить эффективную работу систем водяного отопления. Существующие требования к системам водяного отопления [5] должны обязательно предусматривать возможности не только центрального, но и также местного автоматического регулирования. Кроме этого, при ее эксплуатации, имеют место существенные потери в тепловых сетях (при доставке теплоносителя от источника тепла к радиаторам).

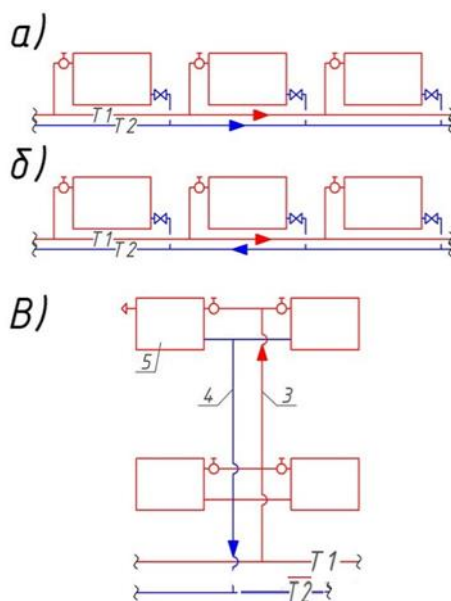


Рисунок 3 – Однотрубная система

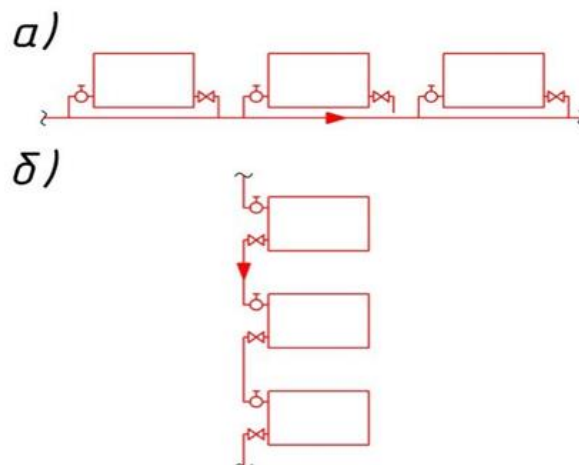


Рисунок 4 – Двухтрубная система

Зачастую системы водяного отопления совмещаются с другими системами отопления. При этом чаще всего проектируются комбинированные системы водяного и воздушного отопления. Последняя, в свою очередь, предварительно прогревает воздух который по воздуховодам поступает в приточные воздухораспределительные устройства и далее в отапливаемые помещения.

Системы воздушного отопления классифицируют по следующим признакам:

по роду энергоносителя – системы с водяными, паровыми, электрическими, газовыми калориферами;

характеру перемещения нагреваемого воздуха – с естественным и механическим побуждением, создаваемым вентилятором;

схеме вентилирования отапливаемых помещений – прямоточные, с частичной и полной рециркуляцией (многократное возвращение потока воздуха в установку) (рисунок 5);

места подогрева воздуха – местные (нагревание воздуха местными отопительными агрегатами) и центральные (нагревание воздуха в общем центральном агрегате с последующей раздачей его по отапливаемым помещениям) [4].

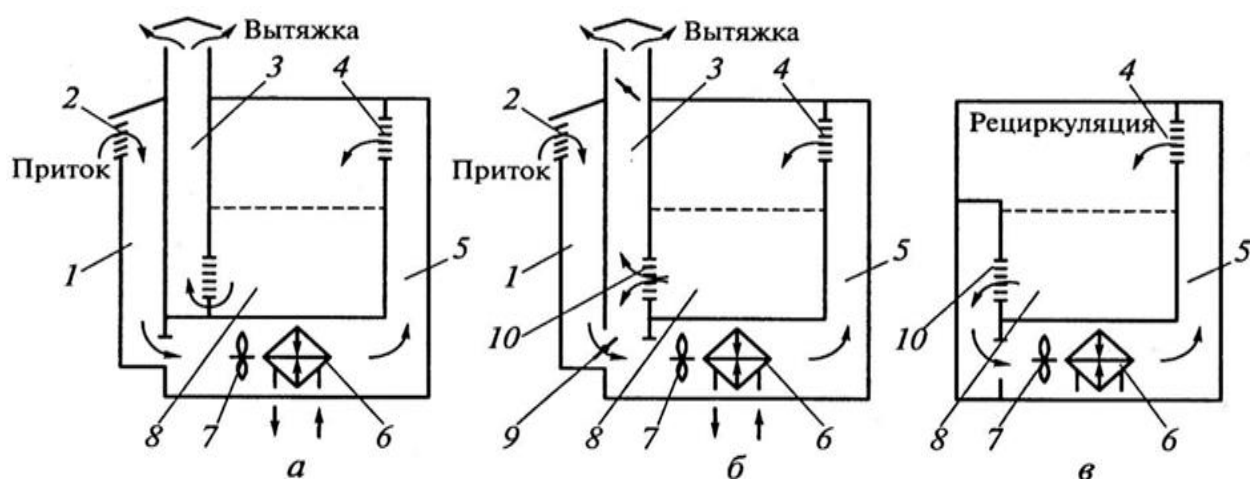


Рисунок 5 – Схемы систем воздушного отопления:

а – прямоточная; б – с частичной рециркуляцией; в – полностью рециркуляционная;
 1 – воздухозаборная шахта; 2, 4, 10 – решетки; 3 – выбросная шахта; 5 – приточный воздуховод; 6 – калорифер; 7 – вентилятор; 8 – рабочая зона; 9 – клапан

В холодное время года в производственных помещениях, имеющих наружные двери и ворота (например, цеха по ремонту тягового подвижного состава), дополнительно используют воздушные тепловые завесы. Они позволяют уменьшить тепловые потери и предотвратить поступление холодного воздуха внутрь.

Воздушные тепловые завесы целесообразно применять там, где наружные двери и ворота очень часто открываются или длительное время остаются в открытом положении (более чем на 40 минут в смену в районах с расчетной температурой наружного воздуха -15°C и ниже) [4], а также необходимо исключить перетекание воздушных масс из одного помещения в другое.

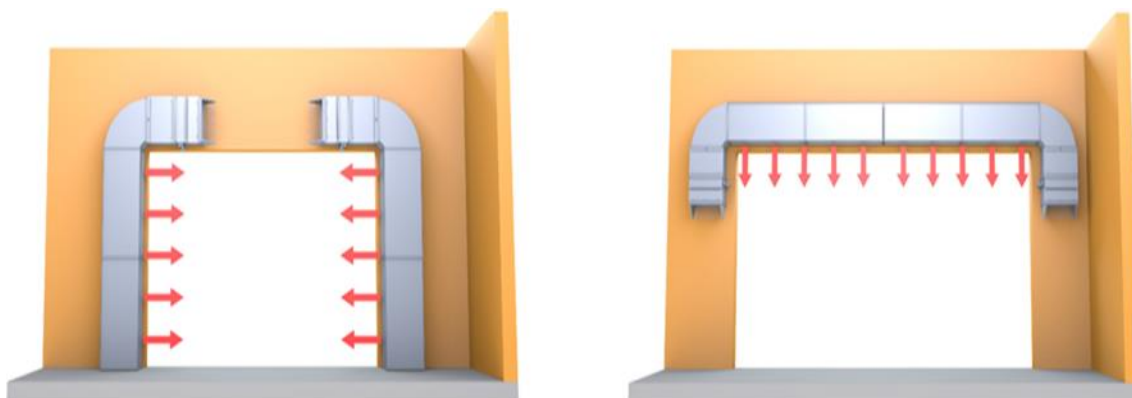


Рисунок 6 – Способы подачи воздуха в воздушных тепловых завесах

В качестве альтернативы последнему решению предлагается рассмотреть *лучистые системы* отопления или *инфракрасные системы* отопления.

К их главной отличительной особенности можно отнести то, что для обогрева помещений используется в основном теплота, отдаваемая за счет лучистого теплообмена. Излучающие панели, расположенные непосредственно над обогреваемой зоной, создают поток теплоты, который проходит через воздух (среду «прозрачную» для теплового излучения) и поглощаются поверхностью пола, стен и других строительных конструкций, оборудования, а также одеждой и кожей людей. Пол и строительные конструкции нагреваются, а затем отдают аккумулированную теплоту, в основном за счет конвекционного теплообмена воздуха, в помещение. Такой характер теплообмена способствует равномерному горизонтальному и вертикальному распределению температуры воздуха в помещении, в отличие от радиаторной системы, и не приводит к дополнительным потерям теплоты через перекрытие и верхнюю часть наружных стен (рисунок 7) [6].

С инфракрасными волнами человечество встречается каждый день: солнце, нагревательные печи и радиаторы, нагретые на солнце камни и теплота, излучаемая людьми – все это излучатели инфракрасных волн. Данная теплота безопасна для человека. Обогрев инфракрасными лучами – это самый древний вид обогрева, он же и самый универсальный [7].

Инфракрасные волны, попадая на кожу человека проникают внутрь и разогревают кровеносные сосуды, такни, суставы и мышцы. Это приводит к ускоренному распространению тепла по телу.

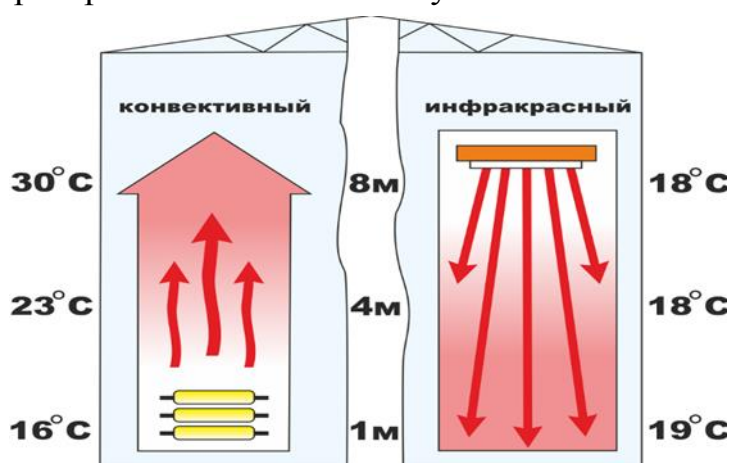


Рисунок 7 – Перепад температур при воздушном и лучистом отоплении

Инфракрасное излучение по виду спектра делится на ближнее, среднее и дальнее. Наиболее безопасным для человека и эффективным для обогрева помещения является диапазон волны спектра от 7 до 14 мкм. Эта часть спектра инфракрасного излучения соответствует излучению самого человеческого тела. Поэтому любое внешнее излучение с такими длинами волн организм человека воспринимает как «свое» излучение [8].

Инфракрасные обогреватели могут быть газовыми (их применяют в основном для обогрева промышленных помещений) и электрическими (чаще используют в быту).

Электрический обогреватель (рисунок 8) состоит из прямоугольного металлического корпуса с элементами крепления к потолку и обращенных к полу теплоизлучающих панелей, в которые вмонтированы ТЭНы.



Рисунок 8 – Электрические инфракрасные обогреватели

Газовые инфракрасные нагреватели (далее – ИКНГ) бывают двух типов: «темные» и «светлые». К «светлым» ИКНГ относятся излучатели с открытым горением газа на поверхности керамической пластины. В этом случае продукты сгорания выделяются непосредственно в отапливаемое пространство. Их

преимущество заключается в большой мощности теплового потока излучения на единицу поверхности. При этом доказано, что большая плотность излучения при длительном воздействии оказывает негативное влияние на человека. Этот вид излучателей лучше использовать там, где люди находятся непостоянно.

Для производственных помещений с высокими потолками целесообразно использовать ИКНГ «темного» типа (рисунок 9). В них газ сгорает в трубке. При этом продукты горения удаляются за пределы отапливаемого помещения через дымоход. Благодаря тому, что газозвдушная смесь сгорает практически полностью, системы лучистого газового отопления являются экологически чистой, в сравнении с котлами на жидком и тем более твердом топливе [8].

В «темных» ИКНГ горение газа проходит в трубе, от которой происходит инфракрасное излучение. При этом продукты сгорания удаляются за пределы помещения через дымоход.

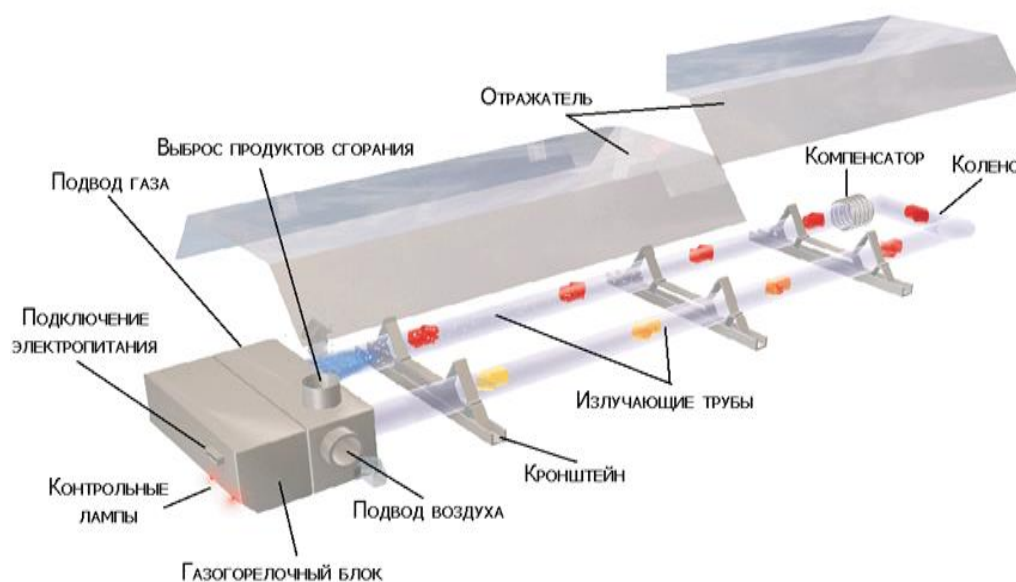


Рисунок 9 – Устройство «темного» ИКНГ

В таблице приведен перечень основных преимуществ и недостатков каждой отдельной системы отопления.

Исходя из преимуществ и недостатков систем отопления, очевидно, что для обеспечения комфортных условий для работы в производственных помещениях, необходимо рассматривать возможность комбинирования различных систем отопления. Определенное преимущество среди имеющихся систем имеет лучистое отопление.

Таблица 1

Преимущества и недостатки различных способов организации отопления

№ п.п.	Вид системы отопления	Преимущества	Недостатки
1.	Водяное	свободная циркуляция воздуха; равномерное распределение теплоты; отсутствует ограничение по видам топлива, имеется возможность их комбинации; возможность контроля температуры; простота обслуживания и ремонта.	требуется котельная или центральное теплоснабжение и теплосеть, теплоносители (радиаторы); риск замерзания системы, «завоздушивания» трубопровода; сложность монтажа.
2.	Воздушное	равномерное прогревание больших цехов (помещений); возможность реконструкции без полного демонтажа; безопасность в эксплуатации; возможность выбора различных режимов работы; наличие различных варианты исполнения; постоянная циркуляция воздуха, очистка, доведение до санитарных требований; высокий уровень пожарной безопасности; совместима с приточными системами вентиляции и кондиционирования.	зависимость от источника нагрева; при отказе системы, помещение довольно быстро остывает; в зависимости от типа производства возможно выделение в атмосферу вредных веществ; потребляет много электроэнергии (дорого); сложность монтажа, наладки и обслуживания.
3	Электрическое	не требует строительства котельной и прокладки теплотрассы; высокая ремонтпригодность; гибкое регулирование температуры.	значительная стоимость электроприборов; потребление электроэнергии; не подходит для больших площадей; используется в качестве временных или местных источников теплоты.
4.	Инфракрасное	экономичность; простота и доступность монтажа; не страшны перепады напряжения в электрической сети; комфортная температура для работы; быстрый нагрев помещения; прямой нагрев (не нужен промежуточный теплоноситель); обогрев отдельных рабочих зон или рабочих мест; возможность поддерживать различную температуру в одном помещении; не требует строительства котельной и прокладки теплотрассы; минимальные потери теплоты; исключено замерзание системы отопления; безопасно для людей и оборудования.	обеспечивает только локальный обогрев; сложность расчета системы при проектировании.

Прежде всего, лучистое отопление экономично и позволяет, в сравнении с традиционными системами отопления, достичь экономии 20...40% [7]. Это достигается за счет исключения многочисленных тепловых потерь при эксплуатации котлоагрегата и при транспортировке. Кроме того, системами лучистого отопления легче управлять (регулировать) в случае снижения потребности в тепловой нагрузке: достаточно отключить одну или несколько горелок. При центральном отоплении регулировать локальную теплоподачу значительно сложнее.

Выводы:

Приведены основные принципиальные схемы организации отопления производственных помещений различного направления использования.

Консолидированы сведения о преимуществах и недостатках водяных, воздушных, электрических и инфракрасных систем отопления.

Показана целесообразность применения инфракрасных обогревателей для обеспечения локального отопления в производственных помещениях.

Список литературы

1. Рожицкий, Д. Б. К вопросу об оперативной оценке влияния расхода котельно-печного топлива для котельных железнодорожного транспорта с учетом изменения температуры атмосферного воздуха / Д. Б. Рожицкий, М. С. Филаткин, Е. В. Драбкина, А. А. Рыбак. – Текст : непосредственный // Энергосбережение и водоподготовка. – 2017. – № 6. – С. 45-52.
2. СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах : утверждены постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 21 июня 2016 г № 81.
3. Рожицкий, Д. Б. Разработка системы автоматизированного расчета и анализа топливо-энергопотребления в стационарной теплоэнергетике железнодорожного транспорта : специальность 05.14.01 Энергетические системы и комплексы : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Рожицкий Дмитрий Борисович; Московский государственный университет путей сообщения. – Москва, 2004. – 192 с. – Текст : непосредственный.
4. Сибикин, Ю. Д. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха / Ю. Д. Сибикин. – Москва : Академия, 2008. – 304 с. – Текст : непосредственный.

5. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха : утверждено приказом Министерства регионального развития РФ от 30 июня 2012 г. № 279.

6. Энергосбережение на железнодорожном транспорте / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, Б. А. Аржанников [и др.]. – Москва : МИСиС, 2012. – 620 с. – Текст : непосредственный.

7. Богуславский, Л. Д. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха / Л. Д. Богуславский, В. И. Ливчак. – Москва : Строиздат, 1990. – 620 с. – Текст : непосредственный.

8. Сидоров, Ю. П. Системы обеспечения микроклимата на объектах железнодорожного транспорта / Ю. П. Сидоров, Т. В. Гагарина, Е. В. Тимошенкова. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. – 260 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рожницкий Дмитрий Борисович

Российский университет транспорта (МИИТ).

125190, г. Москва, ул. Часовая, 22/2.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика и водоснабжение на транспорте» Российского университета транспорта (МИИТ).

Тел.: 8 (495) 602-80-95.

E-mail: rodim@yandex.ru.

Рыбак Алексей Андреевич

Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»).

129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, 10.

Магистр, руководитель проектов

Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»).

Тел.: 8 (495) 602-80-93.

E-mail: Rybak.Aleksey@vniizht.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rozycki Dmitry Borisovich

Russian University of transport (MIIT).

22/2 Chasovaya str., Moscow, 125190.

Candidate of technical Sciences, associate

Professor of the Department of heat And water supply in transport of the Russian University of transport (MIIT).

Phone: 8 (495) 602-80-95.

E-mail: rodim@yandex.ru.

Rybak Alexey Andreevich

All-Russian research Institute of railway transport (JSC "VNIIZHT").

129626, Moscow, 3-ya mytischinskaya str., 10.

Master's degree, project Manager of the all-Russian research Institute of railway transport (JSC "VNIIZHT").

Phone: 8 (495) 602-80-93.

Новиков Антон Юрьевич

Российский университет транспорта
(МИИТ).

125190, г. Москва, ул. Часовая, 22/2.

Магистрант кафедры «Теплоэнергетика и
водоснабжение на транспорте» Российского
университета транспорта (МИИТ).

Тел.: 8 (499) 260-59-68.

E-mail: novikovanton.1983@mail.ru.

Novikov Anton Yurievich

Russian University of transport (MIIT).

22/2 Chasovaya str., Moscow, 125190.

Master's student of the Department of heat And
water supply in transport of the Russian
University of transport (MIIT).

Phone: 8 (499) 260-59-68.

Email address: novikovanton.1983@mail.ru.

УДК 620.91

А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, М. М. Никифоров

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

г. Омск, Российская Федерация

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ТРАНСПОРТ

Статья посвящена анализу современных тенденций развития топливно-энергетического комплекса России, рассмотрены его сильные и слабые стороны. Сделаны выводы о развитии энергетического комплекса железнодорожного транспорта в контексте тенденций развития топливно-энергетического комплекса России.

Ключевые слова: топливно-энергетический комплекс, топливно-энергетические ресурсы, энергетическая безопасность, железнодорожный транспорт.

Alexey L. Kashtanov, Alexander A. Komyakov, Michael M. Nikiforov

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

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF RUSSIAN FUEL AND ENERGY COMPLEX ON RAILWAY TRANSPORT

The paper is devoted to the analysis of modern trends in the development of the Russian fuel and energy complex. Strengths and weaknesses are considered. Conclusions about the development

of the energy complex of railway transport in the context of the trends of the fuel and energy complex of Russia are made.

Keywords: fuel and energy complex, fuel and energy resources, energy security, railway transport.

В 2020 г. введена в действие Энергетическая стратегия России до 2035 г. [1]. В соответствии с ней целями развития энергетики России являются: 1) содействие социально-экономическому развитию страны, 2) укрепление и сохранение позиций России в глобальной энергетической повестке. Следует отметить, что топливно-энергетический комплекс (ТЭК) России сталкивается с большим количеством вызовов и угроз, как внутренних, так и внешних [2 – 6]. Развитие железнодорожного транспорта как крупнейшего потребителя топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и важнейшего элемента системы транспортировки ТЭР безусловно будет в значительной мере зависеть от развития ТЭК России.

На основе [1 – 6] можно выделить следующие сильные и слабые стороны ТЭК России:

Сильные стороны:

1. Россия располагает крупнейшей ресурсной базой, способной обеспечить нужды страны и рациональный экспорт ТЭР.
2. Производство первичной энергии в России значительно превышает внутреннее потребление, обеспечивая энергетическую безопасность страны.
3. Колоссальный опыт в создании и эксплуатации энергетической инфраструктуры и управлении энергоснабжением.
4. Значительные инвестиции компаний ТЭК в основной капитал (около одной трети всего объема инвестиций в России).
5. Российская энергетика является одной из самых низкоуглеродных (более трети генерации электрической энергии приходится на атомную энергетику, гидроэнергетику и другие ВИЭ, около половины – на природный газ).

Слабые стороны:

1. Ухудшение ресурсной базы топливных отраслей по мере истощения действующих месторождений, уменьшение ее размеров, что приводит к увеличению себестоимости добычи.

2. Низкая энергоэффективность экономики России и сектора ТЭК в частности.

3. Несовершенство действующей модели отношений и ценообразования в сфере энергоснабжения и теплоснабжения, в целом ряде случаев применяются нерыночные механизмы.

4. Технологическое отставание отдельных сегментов российского ТЭК, зависимость от импорта некоторых видов оборудования, материалов и услуг.

5. Недостаточные темпы обновления инфраструктуры и производственных фондов.

6. Высокая зависимость от внешнеэкономической конъюнктуры, внешнеполитических и внешнеэкономических факторов, в том числе: снижение темпов роста мировой экономики, жесткая глобальная конкуренция на мировых энергетических рынках, снижение цен на энергоносители, ужесточение политики по вопросам, связанным с изменением климата и его последствиями, санкции, отказ от «углеводородной» энергетики и др.

7. Недостаточный для инновационного развития текущий и перспективный объем спроса на ТЭР на внутреннем рынке.

8. Ограниченные возможности привлечения доступных долгосрочных финансовых ресурсов.

9. Дисбаланс размещения центров производства и потребления энергетических ресурсов (происходит все большая концентрация экономического роста и энергопотребления в центральных районах европейской части страны и смещение добычи и производства ТЭР в северные и восточные районы).

10. Недостаточное развитие ВИЭ, за исключением гидроэнергетики.

Указанные факторы обуславливают следующие основные приоритеты развития ТЭК России: обеспечение энергетической безопасности; цифровая трансформация и интеллектуализация отраслей ТЭК; ускоренная газификация, развитие рынка газомоторного топлива, сжиженного природного газа (СПГ); водородные технологии; опережающее развитие добычи и переработки энергоресурсов в восточных регионах страны; увеличение доли России на международных рынках энергоресурсов; усиление позиций в сегменте поставок оборудования, технологий и сервисных услуг, в том числе ВИЭ.

Выполненный анализ позволяет сделать следующие выводы относительно влияния тенденций развития ТЭК на ОАО «РЖД» как потребителя ТЭР:

1. Постепенное снижение мирового спроса на углеводороды в перспективе приведут к снижению стоимости ТЭР на внешних рынках. Однако на внутреннем рынке, в том числе и для ОАО «РЖД» как потребителя ТЭР, снижение тарифов не ожидается, особенно в связи с необходимостью значительных инвестиций в ТЭК. Это обуславливает необходимость дальнейшей интенсификации деятельности по энерго- и ресурсосбережению в ОАО «РЖД», в том числе за счет развития систем энергоменеджмента, применения прорывных энергоэффективных технологий с учетом специфических условий их работы на железнодорожном транспорте.

2. В перспективе до 2035 года ОАО «РЖД» не должно испытывать глобальных проблем с дефицитом ТЭР на внутреннем рынке. В отдельных регионах (Сибирь, Дальний Восток) в настоящее время наблюдается недостаток энергетических мощностей, необходимых, например, для электрификации Восточного полигона. Однако данный фактор должен нивелироваться за счет приоритетного опережающего развития добычи и переработки ТЭР в восточных регионах страны.

Потенциальной угрозой для энергобезопасности ОАО «РЖД» могут стать развитие международного рынка электроэнергии, что потенциально может привести к ее дефициту на внутреннем рынке, а также предсказываемая практически всеми экспертами стагнация и деградация угольной отрасли в совокупности с ужесточением экологических требований, что приведет с одной стороны к закрытию большого количества угольных ТЭС и котельных, а с другой стороны – к снижению грузооборота.

3. Перспективным является расширение участия железнодорожного транспорта в формировании энерготранспортных коридоров на постсоветском пространстве и евразийском континенте, в том числе в интересах энергоснабжения собственных объектов в зоне действия коридоров (учитывая состоявшееся значение железных дорог в функционировании и развитии отраслей ТЭК).

4. Опережающее развитие международного и российского рынка природного газа и СПГ, подтверждаемое мировыми консенсус-прогнозами,

позволяет говорить о необходимости интенсификации деятельности по применению газомоторного топлива на автономном железнодорожном подвижном составе и автотранспортной технике, по переводу на газ теплоснабжающих и теплопотребляющих объектов железнодорожного транспорта.

5. Продолжающиеся тенденции по цифровизации ТЭК России, развитию «умных» (smart) технологий распределенной генерации в энергетике говорят о целесообразности значительного увеличения инвестиций ОАО «РЖД» в данном направлении во избежание запаздывания стратегического ориентирования компании.

6. Приоритетное развитие водородных технологий и систем накопления энергоресурсов в ТЭК России создает вызов для ОАО «РЖД» и позволяет говорить о необходимости увеличения инвестиций в НИОКР по разработке подвижного состава с водородными двигателями, а также с накопителями электроэнергии.

7. Опережающее развитие ВИЭ позволяет говорить о необходимости развития собственной генерации в ОАО «РЖД», особенно с учетом перспективы снижения себестоимости вырабатываемой ими энергии в сравнении с углеводородной энергетикой.

8. Перспективной является переориентация малой нетяговой энергетики на местные источники энергоснабжения при условиях гарантированного долгосрочного ресурсного обеспечения, экономической и экологической эффективности (торф, уголь, попутный нефтяной газ, биотопливо, биомасса, возобновляемые энергоресурсы, утилизация отходов и т. д.) с учетом региональной специфики топливных балансов, конкурентного энергопотребления и возможностей приграничной торговли энергоресурсами.

Результаты представленного анализа тенденций развития топливно-энергетического комплекса России должны быть учтены при определении направлений деятельности ОАО «Российские железные дороги» как с точки зрения возможностей использования ТЭР, так и перспектив изменения грузопотоков. В то же время требования, утвержденные в [1, 4], а также в иных нормативных и правовых документах Российской Федерации [7], должны использоваться при периодическом обновлении Энергетической стратегии ОАО «РЖД» [8, 9], являющейся ключевым документом, определяющим

направления работ по энергосбережению и повышению эффективности использования ТЭР на железнодорожном транспорте.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года : утверждена распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р.
2. Госдоклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации. – Москва : Минэкономразвития, 2019. – 85 с.
3. Отчет о мониторинге реализации в 2019 году Прогноза научно-технологического развития отраслей ТЭК России на период до 2035 года в целях его дополнения и уточнения.
4. Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации : утверждена Указом Президента РФ от 13 мая 2019 г. № 216.
5. Статистический сборник «ТЭК России – 2019». – Москва : Аналитический центр при Правительстве РФ. – 2019. – 62 с.
6. Энергетический бюллетень. – Москва : Аналитический центр при Правительстве РФ. – № 85. – 2020. – 29 с.
7. Никифоров, М. М. Нормативно-правовое обеспечение деятельности по энергосбережению в холдинге «Российские железные дороги» / М. М. Никифоров, В. Л. Незевак // Известия Транссиба. – 2015. – № 4 (24). – С. 68-75.
8. Каштанов, А. Л. Актуализация энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» / А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, А. А. Комяков // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 141-147.
9. Никифоров, М. М. О работе по актуализации энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года / М. М. Никифоров, А. Л. Каштанов, А. А. Комяков // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем : материалы второй науч.-практич. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 159-165.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каштанов Алексей Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, начальник научно-производственной лаборатории «Энергосбережение и энергоэффективность на ж.д. транспорте», доцент кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: kesh-al@rambler.ru

Комяков Александр Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: tskom@mail.ru

Никифоров Михаил Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заместитель директора Научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте Омского государственного университета путей сообщения.

Тел.: (381-2) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kashtanov Alexey Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Cand.Tech.Sci., Head of Research and Production Laboratory «Energy saving and energy efficiency on the railway Transport», The Senior Lecturer Of Chair «Theoretical Electrical Engineering» OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: kesh-al@rambler.ru

Komyakov Alexandr Anatolevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Theoretical the electrical engineer» OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: tskom@mail.ru.

Nikiforov Mikhail Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Cand.Tech.Sci, deputy director, Research Institute for Energy Efficiency in Railway Transport, Omsk State Transport University.

Phone: (381-2) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru.

А. С. Гусаров, В. В. Овсянников

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКОЙ ПРИ ВЫРАБОТКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЭС

Рассмотрено влияние выработки электроэнергии на тепловом потреблении на эффективность работы паротурбинной установки.

Ключевые слова: комбинированный цикл, электроэнергия, паротурбинная установка, параметры пара.

Artem S. Gusarov, Vitaliy V. Ovsyannikov

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

INCREASING THE EFFICIENCY OF CONTROL OF A STEAM TURBINE PLANT WHEN GENERATING ELECTRIC POWER AT TPP

The influence of electricity generation based on heat consumption on the efficiency of a steam turbine plant is considered.

Keywords: combined cycle, electric power, steam turbine plant, steam parameters.

Каждая паротурбинная установка (ПТУ) снабжается системой регенеративного подогрева питательной воды паром из регенеративных отборов из проточной части турбины. Применение регенеративного подогрева на ТЭС увеличивает КПД конденсационных турбоустановок, позволяет повышать выработку электрической энергии на тепловом потреблении в теплофикационных установках.

Вопрос определения выработки электроэнергии на тепловом потреблении касается взаимного влияния расходов пара из теплофикационных отборов турбины и из регенеративных отборов, суммарно создающих эффект этой выработки. Оценить и учесть эти взаимосвязи и является целью предлагаемых

читателю результатов исследований.

В качестве примера рассмотрим в структурном виде (рисунок 1) схему теплофикационной паротурбинной установки, имеющей один отбор пара для целей теплофикации №1 с долей расхода пара $\gamma = \frac{D_1}{D_0}$, и три отбора пара на регенерацию - №2, №3, №4, с соответствующими долями расхода $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$.

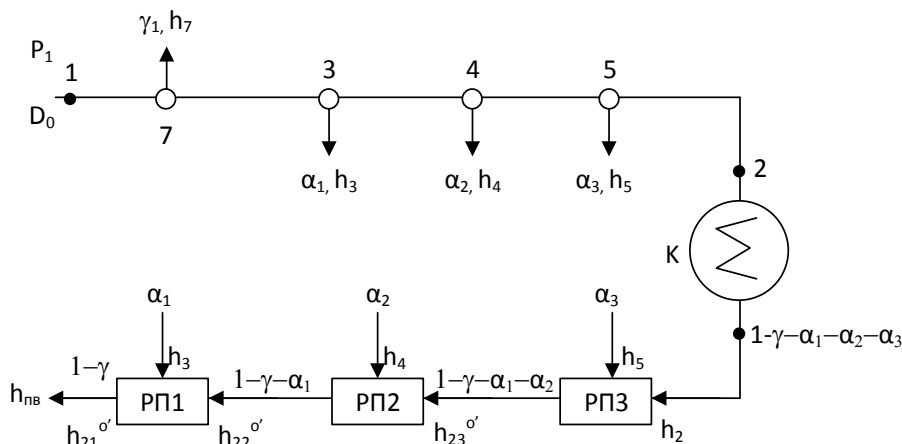
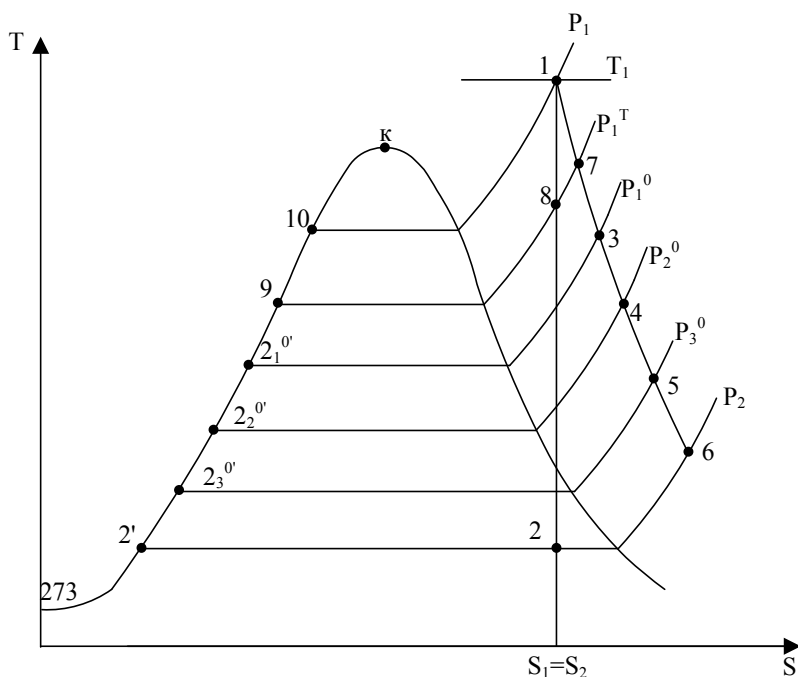


Рисунок 1 – Схема теплофикационной паротурбинной установки

Общий расход пара в долях соответствует условию: $1 = \gamma + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$

В соответствии с обозначениями приведем рабочий процесс ПТУ в координатах T-S.



Условные обозначения: P^T - абсолютное давление пара теплофикационного отбора; P_1^o, P_2^o, P_3^o - абсолютные давления пара регенеративных отборов.

Составляем тепловые балансы смешивающих подогревателей РП1, РП2, РП3 и определяем доли расходов пара из регенеративных отборов в эти подогреватели по формулам:

а) для РП1

$$\alpha_1 = \frac{(1 - \gamma)(h_{21}^{o'} - h_{22}^{o'})}{h_3 - h_{21}^{o'} - h_{22}^{o'}}, \quad (1)$$

б) для РП2

$$\alpha_2 = \frac{(1 - \gamma - \alpha_1)(h_{22}^{o'} - h_{23}^{o'})}{h_4 - h_{22}^{o'} - h_{23}^{o'}}, \quad (2)$$

в) для РП3

$$\alpha_3 = \frac{(1 - \gamma - \alpha_1 - \alpha_2)(h_{23}^{o'} - h_{21}')}{h_5 - h_{23}^{o'} - h_{21}'}, \quad (3)$$

При заданных начальных параметрах пара и давлениях отборов –

$P^T = 0,6$ МПа; $P_1^o = 0,8$ МПа; $P_2^o = 0,4$ МПа; $P_3^o = 0,1$ МПа расчетные результаты сведены в таблицу 1.

Данные таблицы 1 показывают, что с ростом расхода пара в теплофикационный отбор изменяются расходы пара в регенеративные отборы. Причем, уменьшаются почти в два раза.

Характер зависимости $\alpha = f(\gamma)$ наглядно показан на рисунке 3 в виде прямых линий, стремящихся к нулевому знаменитию при максимальном значении $\gamma = 1$.

В таблицу 2 занесены результаты расчетов выработки электроэнергии на тепловом потреблении. В основу определения взяты составляющие полезной работы, совершаемой относимыми к тепловому потреблению отборами пара – теплофикационному и на регенерацию. Каждый из указанных отборов в соответствии с рисунком 2 совершает полезную работу в политропном термодинамическом процессе: теплофикационный отбор – в процессе 1-7; отбор на регенерацию в первый подогреватель РП1 – в процессе 1-3; во второй

РП2 – в процессе 1-4; в третий РПЗ – в процессе 1-5.

Таблица 1

Изменение долей регенеративных отборов пара

Доля отбора пара на теплофикацию, γ	Доля отборов пара в регенеративные подогреватели			Доля пара – пропуск в конденсатор $\alpha_k = 1 - (\gamma + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)$
	α_1	α_2	α_3	
0	0,075	0,099	0,123	1-0,297=0,703
0,1	0,068	0,089	0,110	1-0,367=0,633
0,2	0,060	0,079	0,098	1-0,437=0,563
0,3	0,052	0,069	0,086	1-0,507=0,493
0,4	0,045	0,059	0,074	1-0,578=0,422
0,5	0,038	0,050	0,061	1-0,649=0,351
0,6	0,030	0,040	0,049	1-0,719=0,281

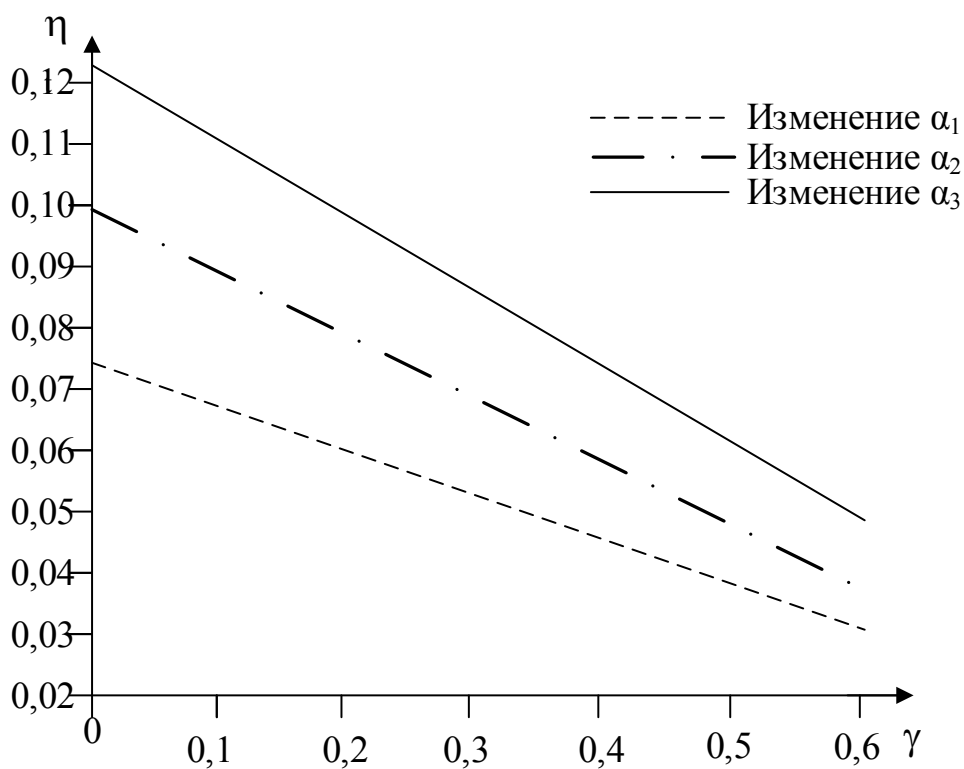


Рисунок 3 – Влияние доли отбора пара на теплофикацию на долю отбора пара в регенеративные подогреватели

Вычисление полезной работы в каждом процессе производилось по формулам термодинамики:

$$l_{1-7} = q_{1-7} - \Delta U_{1-7}; \quad (4)$$

$$q_{1-7} = \frac{T_1 + T_7}{2} (S_7 - S_1); \quad (5)$$

$$\Delta U_{1-7} = (h_7 - h_1) - (P_7 V_7 - P_1 V_1). \quad (6)$$

Формулы (4), (5), (6) записаны в качестве примера для процесса 1-7. Они аналогичны для всех указанных процессов.

Полезная работа 1 кг пара вычисляется по формуле:

$$l = l_{1-7} \cdot \gamma + l_{1-3} \cdot \alpha_1 + l_{1-4} \cdot \alpha_2 + l_{1-5} \cdot \alpha_3. \quad (7)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Вычисление полезной работы при принятом электромеханическом КПД $\eta_{эм} = 0,96$ позволило определить выработку электроэнергии на тепловом потреблении, Э, кДж на 1 кг расхода пара в проточную часть турбины. На основании этих вычислений получены значения удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении.

$$\bar{q} = \frac{\text{Э}}{Q^T + Q^P} \cdot \frac{10^6}{3600}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{ГДж}}; \quad \bar{q}_T = \frac{\text{Э}_T}{Q^T} \cdot \frac{10^6}{3600}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{ГДж}}; \quad (8)$$

Таблица 2

Результаты расчетов выработки электроэнергии на тепловом потреблении
при $\eta_{oi} = 0,82$

Доли отборов пара на теплофикацию, γ	Полезная работа в процессах 1-7, 1-3, 1-4, 1-5, взятая соответствующими долями, кДж/кг				Доля пара пропуска в конденсатор	Полезная работа от пропуска в конденсатор, кДж/кг	Вся полезная работа в цикле, $\sum l$, кДж/кг	Термический КПД цикла, $\eta_t = \frac{\sum l}{q_1}$	Суммарная полезная работа от отборов пара, $\sum l_{\text{отб.}}$, кДж/кг	Выработка электроэнергии на тепловом потреблении, Э, кДж/кг
	l_{1-7}	l_{1-3}	l_{1-4}	l_{1-5}						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	47,040	74,318	120,917	0,703	1025,290	1267,565	0,464	242,275	232,584
0,1	68,083	42,649	66,811	108,137	0,633	923,189	1208,869	0,442	285,680	274,253
0,2	136,166	37,632	59,304	96,340	0,563	821,107	1150,549	0,421	329,442	316,264
0,3	204,250	32,614	51,797	84,544	0,493	719,016	1092,221	0,400	373,205	358,277
0,4	272,333	28,224	44,290	72,747	0,422	615,466	1033,060	0,378	417,594	400,890
0,5	340,416	23,833	37,534	59,967	0,351	511,916	973,666	0,356	461,750	443,280
0,6	408,499	18,816	30,027	48,170	0,281	409,824	915,336	0,335	505,512	485,292

Из таблицы 2 следует, что удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении зависит от загрузки теплофикационного отбора γ .

Выводы.

1. Выработку электроэнергии на тепловом потреблении следует определять на основе анализа тепловой схемы паротурбинной установки,

измерения параметров рабочего процесса и вычисления значений по предлагаемому алгоритму.

2. Наиболее точные значения удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении определяются с учетом отпускаемого количества тепло на регенерацию.

3. При измерении рабочих параметров пара возможна диагностика проточной части турбины и проверка принимаемого значения при расчетах относительного внутреннего КПД η_{oi} .

4. При повышении выработки электроэнергии на тепловом потреблении – повышается эффективность работы ТЭЦ.

Список литературы

1. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети : учебник для вузов / Е. Я. Соколов. – Изд. 7-е, стереот. – Москва : МЭИ, 2001. – 472 с. – Текст : непосредственный.

2. Лебедев, В. М. Источники и системы теплоснабжения предприятий : монография / В. М. Лебедев, С. В. Приходько / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2010. – 232 с. – Текст : непосредственный.

3. Гусаров, А. С. О влиянии необратимости в термодинамическом цикле паротурбинной установки с отбором пара на его термический КПД / А. С. Гусаров, В. В. Овсянников // Энергетика и теплотехника : сб. науч. трудов / под ред. В. Е. Накорякова. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2016. – Вып. 20. – С. 183-188 – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Овсянников Виталий Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск 644046,

Российская Федерация.

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

Тел.: (3812) 31-06-23.

E-mail: witaliy1936@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ovsiyannikov Vitaliy Vasilevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Ph.D. in Technical Sciences, Associate

Professor of the department «Thermal engineering» OSTU.

Phone: (3812) 31-06-23.

E-mail: witaliy1936@yandex.ru

Гусаров Артем Сергеевич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск 644046,

Российская Федерация.

Преподаватель кафедры

«Теплоэнергетика» ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-23.

E-mail: henaro9812@gmail.com.

Gusarov Artem Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Lecturer of the Department «Thermal
engineering» OSTU.

Phone: (3812) 31-06-23.

E-mail: henaro9812@gmail.com.

УДК 621.331.1

С. Г. Истомин, Е. Г. Авдиенко

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

г. Омск, Российская Федерация

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ АВТОВЕДЕНИЯ И СИСТЕМ ИНФОРМИРОВАНИЯ МАШИНИСТА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В статье проведен обзорный анализ существующих систем автоведения и систем информирования машиниста применяемые на подвижном составе

Ключевые слова: электроподвижной состав, автоведение, информирование машиниста.

Stanislav G. Istomin, Egor G. Avdienko

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

ANALYZE EXISTING SYSTEM OF AUTOMATIC TRAIN OPERATION AND SYSTEM OF LOCOMOTIVE DRIVER INFORMATION ON ROLLING STOCK

The article provides an overview analysis of the existing systems for driving and information systems for the driver used on the rolling stock.

Keywords: electric rolling stock, automatic train operation, informing the driver.

В настоящее время на российском подвижном в большинстве случаев установлена система автоведения от компании «АВП Технология»: унифицированная система автоматизированного ведения поездов (УСАВП), универсальная система автоведения электровозов пассажирского движения (УСАВПП), система универсальная автоведения электровозов грузового движения (УСАВП-Г), а также интеллектуальная система автоматизированного вождения поездов повышенной массы и длины с распределёнными по длине локомотивами (ИСАВП-РТ). В дальнейшем произошла модернизация этих систем путём интеграции в кабину управления таких программного-аппаратных комплексов как система информирования машиниста (СИМ) и система информирования машиниста автономная с функцией электронного маршрута машиниста (АСИМ-ЭММ). Далее будет представлен более подробный анализ данных систем с указанием некоторых недостатков и недоработок.

Рассмотрим функциональные возможности системы УСАВП [1]. Система предназначена для обеспечения автоматического управления режимами тяги и торможения электропоездов постоянного и переменного тока, позволяет с высокой точностью выполнять график движения при обеспечении оптимального расхода электроэнергии на тягу, облегчает работу машинистов. Система автоведения пригородных электропоездов выполнена на базе микропроцессорных технологий и представляет собой программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий автоматизированное управление электропоездом.

Основные составляющие эффекта применения системы автоведения:

- позволяет сократить расход электроэнергии от 2 до 10% (в зависимости от условий эксплуатации);
- повышается уровень безопасности движения;
- обеспечивается информационная поддержка деятельности машиниста в ночные и утренние часы, а также в условиях плохой видимости (снег, дождь, туман);
- снижает отрицательное влияние сложных поездных ситуаций на психофизиологическое состояние машиниста;

- сокращает сроки обучения машинистов и освоения малоопытными машинистами энергооптимальных режимов ведения поезда;
- существенно повышает качество обслуживания пассажиров за счет точного соблюдения расписания и гарантированного объявления названий остановочных пунктов и другой социальной информации.

Система УСАВП-П [2] разработана специально для пассажирских электровозов определённых серий для автоматизированного управления электровозами ЧС2, ЧС2К, ЧС2Т, ЧС4Т, ЧС6, ЧС7, ЧС8, ЧС200, ЭП1М, ЭП2К, ЭП20, КЗ4АТ. Автоматизированное управление осуществляется в режиме оптимального расхода электроэнергии при точном выполнении времени хода (задаваемого графиком движения или другим нормативным документом). Использование УСАВП-П способствует повышению безопасности движения и облегчает труд машиниста. Её главной особенностью от других систем является то, что УСАВП-П обеспечивает не только поддержание выбранной системой или заданной машинистом скорости, но и способна постоянно рассчитывать ее оптимальное значение для минимизации расходуемой электроэнергии и исполнения расписания движения поезда с точностью ± 1 мин.

Системы УСАВП-Г [3] и переменного УСАВП-ГПТ тока предназначены для автоматизированного управления электровозами типа ВЛ10, ВЛ11, ВЛ80С, ВЛ85, 2ЭС5К (3ЭС5К), КЗ8А, 2ЭС5, 2ЭС6, 2ЭС4К (3ЭС4К). Также она была модернизирована добавлением функции системы информирования машиниста, которая разрабатывалась на основании утверждённых ОАО «РЖД» требованиям с целью расширения функционала возможностей системы автоведения.

Система ИСАВП-РТ [4] разрабатывалась также для грузовых поездов, но только повышенной массы и длины. Она предназначена для автоматизированного и синхронного управления грузовыми электровозами при вождении соединённых поездов до 12 тыс. тонн и выше. Данная система обладает таким-же функционалом, что и выше представленные системы только с не которыми отличиями. ИСАВП-РТ способна управлять блоком хвостового вагона (БХВ) и системой управления тормозами поезда СУТП или РУТП с поездами до 9000 тыс. тонн.



Рисунок 1 – Процесс передачи данных

Реализация данной системы позволила повысить пропускную способность участков на 5%, увеличила маршрутную скорость, повысила маршрутную скорость до 1000 км/сутки и снизила обороты подвижного состава на 20%.

Для более детального понимания эффективности внедрения системы УСАВП, её нужно одновременно рассматривать с дополняющим комплексом системы информирования машиниста (СИМ) и её более совершенной версии АСИМ-ЭММ. Она предназначена для получения по беспроводным каналам связи от системы взаимодействия с локомотивом посредством радиосвязи различные данные о занятости пути, возможности инфраструктуры, данных о машинисте и т.д. Система обеспечивает отображение всей поступающей информации в графической, текстовой и речевой форме для локомотивной бригады. Все эти факторы позволяют повысить безопасность движения в пути следования за счёт автоматизации процессов получения и передачи данных по беспроводным каналам связи. На рисунке 2 представлен процесс передачи данных.

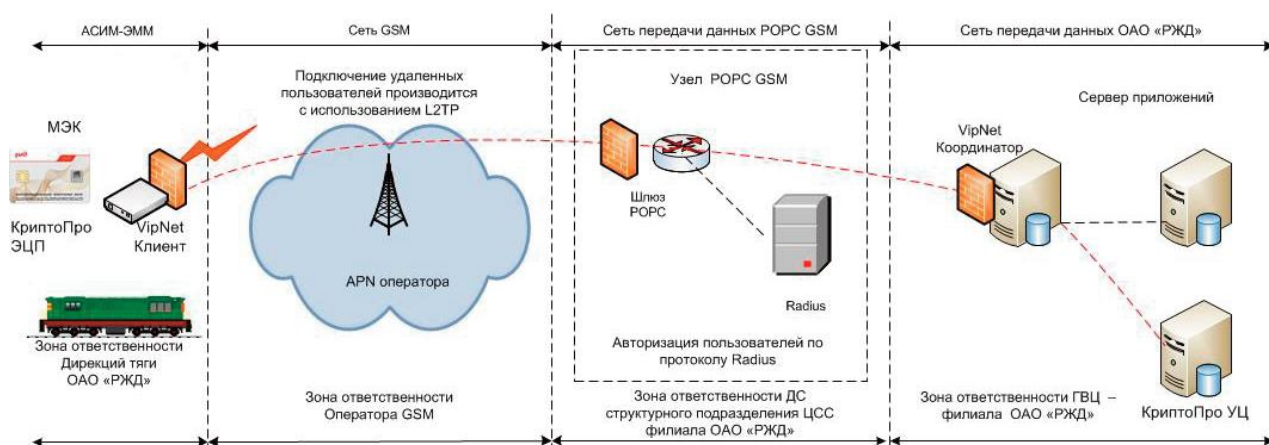


Рисунок 2 – Процесс передачи данных с борта электроподвижного состава на сервер по беспроводным каналам связи

В таблице 1 представлена систематизация функциональных возможностей существующих систем автоведения.

Таблица 1

Сравнительный анализ систем автоведения

Системы Функционал	УСАВП	УСАВП-П	УСАВП-Г	ИСАВП-РТ
Расчёт энергооптимальной траектории движения	+	+	+	+
Изменение энергооптимальной траектории движения в режиме реального времени	-	-	-	-
Регистрация параметров движения (скорость, время)	+	+	+	+
Сигналы датчиков углового перемещения	+	+	+	+
Принятие сигналов от АЛСН	+	+	+	+
Сигналы от аэродинамических датчиков	-	-	-	-
Исполнение расписание движения	+/-	+/-	+/-	+/-
Статусы ближайших участников движения	-	-	-	-
Учёт расхода электроэнергии	+/-	+/-	+/-	+/-
Управление тормозным оборудованием	+	+	+	+
Информирование машиниста	+/-	+/-	+/-	+/-
Связь с энергетической инфраструктурой	-	-	-	-

Как можно заметить, что функционал существующих систем на данный момент имеет некоторые ограничения, что свидетельствует о перспективах их развития с использованием новых информационных технологий.

В концепции реализации технического проекта «Цифровая железная дорога» [5] отмечена необходимость внедрения прорывных информационных технологий «Industrial Internet of Things» (Промышленный Интернет Вещей) и «Big Data» (Большие Данные) для реализации системы автоведения, которая будет учитывать заданный график движения поездов, возможности инфраструктуры, команды диспетчерских центров, техническое состояние подвижного состава и статусы ближайших участников движения, а также технологии «Imitation Modeling» (Имитационное Моделирование) для управления вагонами и локомотивами, позволяющей определять оптимальный режим работы подвижного состава с учётом его местонахождения, владельца, статуса, планов использования и технического состояния.

Реализация поставленных задач концепции позволит реализовать полноценное беспилотное управление электроподвижным составом, которое позволит, в частности, снизить расход потребления электроэнергии и повысить безопасность движения подвижного состава в пути следования.

Список литературы

1. Унифицированная система автоматизированного ведения поездов (УСАВП) Модификация УСАВП/1 : Руководство по эксплуатации ЛАРП.468322.002РЭ-01. – ООО «АВП Технология», 1999. – 33 с. – Текст : непосредственный.

2. Универсальная система автоведения электровозов пассажирского движения (УСАВПП) : Руководство по эксплуатации КНГМ.466451.001 РЭ. – ООО «АВП Технология», 2011. – 127 с. – Текст : непосредственный.

3. Система универсальная автоведения электровозов грузового движения (УСАВП-Г) : Руководство по эксплуатации КНГМ.466451.003РЭ. – ООО «АВП Технология», 2011. – 42 с. – Текст : непосредственный.

4. Система ИСАВП-РТ 2ЭС5 : Руководство по эксплуатации АЮВП. 468382.021РЭ. – ООО «АВП Технология», 2015. – 67 с. – Текст : непосредственный.

5. Концепция реализации комплексного научно технического проекта «Цифровая железная дорога» № 1285р : утверждена распоряжением ОАО

«РЖД» от 05.12.2017. / ОАО «РЖД». – Москва, 2017. – 92 с.– Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Истомин Станислав Геннадьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

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

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: istomin_sg@mail.ru.

Авдиенко Егор Геннадьевич

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) 31-34-19.

E-mail: sleyter.ua@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Istomin Stanislav Gennadevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department

«Rolling stock electric railways» OSTU.

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

E-mail: istomin_sg@mail.ru.

Avdienko Egor Genndievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Graduate student of the department "Rolling stock of electric railways" OSTU.

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

E-mail: sleyter.ua@gmail.com.

УДК 621.331.1

А. Е. Перестенко, С. Г. Истомин

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

г. Омск, Российская Федерация

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОНЛАЙН МОНИТОРИНГА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА И УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В статье приведены основные результаты проведения экспериментальных исследований в границах межподстанционных зон Фадино – Новоселецк, Новоселецк –

Стрела участка Входная - Иртышское. В результате проведения исследований выявлены проблемы, которые в настоящий момент препятствуют организации онлайн мониторинга эксплуатационных показателей электроподвижного состава и устройств электроснабжения. Показана возможность организации стыковки данных с различных автоматизированных систем ОАО «РЖД», а также измерительных систем ОмГУПС, которая позволит оценивать потери в тяговой сети, потери на собственные нужды электроподвижного состава, расход электроэнергии на тягу и возврат электроэнергии в контактную сеть, а также перейти к реализации предикативного управления режимами работы электроподвижного состава и энергетической инфраструктуры железных дорог в изменяющихся условиях перевозочного процесса, что позволит обеспечить наилучшие условия для реализации силы тяги, рекуперативного торможения, заданных графиков движения поездов, в том числе при критических ограничениях со стороны системы электроснабжения, не допуская остановку движения поездов.

Ключевые слова: электроподвижной состав, устройства электроснабжения, потери электроэнергии в тяговой сети, потери электроэнергии на собственные нужды, синхронные измерения.

Artem E. Perestenko, Stanislav G. Istomin

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

EXPERIMENTAL STUDIES OF ONLINE MONITORING OF PERFORMANCE INDICATORS OF ELECTRIC MOTOR STAFF AND POWER SUPPLY DEVICES

The article presents the main results of experimental studies within the boundaries of the inter-substation zones Fadino - Novoseletsk, Novoseletsk - Strela of the Vhodnaya - Irtyshskoye section. As a result of the research, problems were identified that currently impede the organization of online monitoring of the operational indicators of electric rolling stock and power supply devices. The possibility of organizing the docking of data from various automated systems of Russian Railways, as well as measuring systems of OSTU is shown, which will allow assessing losses in the traction network, losses for auxiliary needs of electric rolling stock, electricity consumption for traction and return of electricity to the contact network, as well as implementation of predictive control of the operating modes of electric rolling stock and energy infrastructure of railways in the changing conditions of the transportation process, which will provide the best conditions for the implementation of traction force, regenerative braking, specified train schedules, including with critical restrictions on the part of the power supply system, avoiding stopping train movement.

Keywords: electric rolling stock, power supply devices, power losses in the traction network, power losses for own needs, synchronous measurements.

В настоящее время в компании ОАО «РЖД» разработана стратегия цифровой трансформации холдинга, которая полностью интегрирована с Указом Президента Российской Федерации «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», программой «Цифровая экономика Российской Федерации» и Долгосрочной программой развития ОАО «РЖД» до 2025 года. В рамках реализации Долгосрочной программы комплексный научно-технический проект «Цифровая железная дорога» имеет цель повысить конкурентоспособность и эффективность деятельности холдинга «РЖД» за счет применения прорывных информационных технологий [1-3]: технологии «Industrial Internet of Things» (Промышленный Интернет Вещей) и «Big Data» (Большие Данные) для автоведения, учитывающего заданный график движения поездов, возможности инфраструктуры, команды диспетчерских центров, техническое состояние подвижного состава и статусы ближайших участников движения; для постоянного сбора первичных данных о состоянии подвижного состава и объектов инфраструктуры с последующим формированием комплексного описания объектов в целях управления их жизненным циклом, контроля состояния подвижного состава в движении, цифровой диагностики объектов инфраструктуры, а также оперативного взаимодействия с участниками производственной деятельности и поставщиками/

Учитывая изложенное выше, актуальной научной проблемой является разработка современных систем обработки больших объемов разнородных данных, позволяющих, в частности, комплексно оценивать потери электроэнергии электроподвижным составом и устройствами электроснабжения и выявлять потенциал для улучшения их энергетической эффективности.

В целях оценки готовности существующих автоматизированных систем ОАО «РЖД» по обработке больших объемов данных и измерительных систем ОмГУПС к проведению онлайн мониторинга эксплуатационных показателей электроподвижного состава и устройств электроснабжения на Западно-Сибирской железной дороге был проведен эксперимент.

Полигоном для проведения исследований определен участок Фадино – Новоселецк – Стрела Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «Российские железные дороги».

В ходе проведения экспериментальных работ измерения проводились на тяговых подстанциях Фадино, Новоселецк, Стрела, а также на обращающихся на участке электровозах.

Измерения электроэнергии, тока и напряжения на фидерах контактной сети тяговых подстанций Фадино, Новоселецк и Стрела выполнялись с помощью измерительных систем ОмГУПС синхронно с измерительными системами на электроподвижном составе. Измерения на электроподвижном составе осуществляются с помощью регистраторов параметров движения МСУЛ-РПМ (производства ООО «НПО САУТ») и РПДА-Г (производства ООО «АВП Технология») с учетом местоположения подвижной единицы по системе Глонасс и фиксации глобального времени. Также использовалась информация о расписании движения поездов по данным системы ГИД «Урал-ВНИИЖТ» и отчеты «Расход топлива по номеру поезда», «Расход ТЭР по машинистам» системы КИХ ЛП «Локомотивные парки».

Ранее в работах [4-12] были заложены методические основы обработки данных систем ОАО «РЖД». В данной работе была апробирована возможность объединения существующих данных о тяге поездов от различных источников с целью определения различных параметров в пределах межподстанционных зон.

После сбора достаточного количества данных они были подвергнуты многоступенчатой обработке, общая схема которой изображена на рисунке 1.

В результате была сформирована многомерная матрица объектов-признаков, включающая в себя следующие блоки информации:

Номинальные признаки: номер поезда, номер локомотива, табельный номер машиниста и т. д. Часть этих признаков формирует первичный ключ;

Константные для поездки количественные признаки: масса состава, число осей, время пересечения границ МПЗ и т. д.;

Изменяющиеся во времени количественные признаки: токи и напряжения ЭПС, подстанций и тяговой сети и т. д.

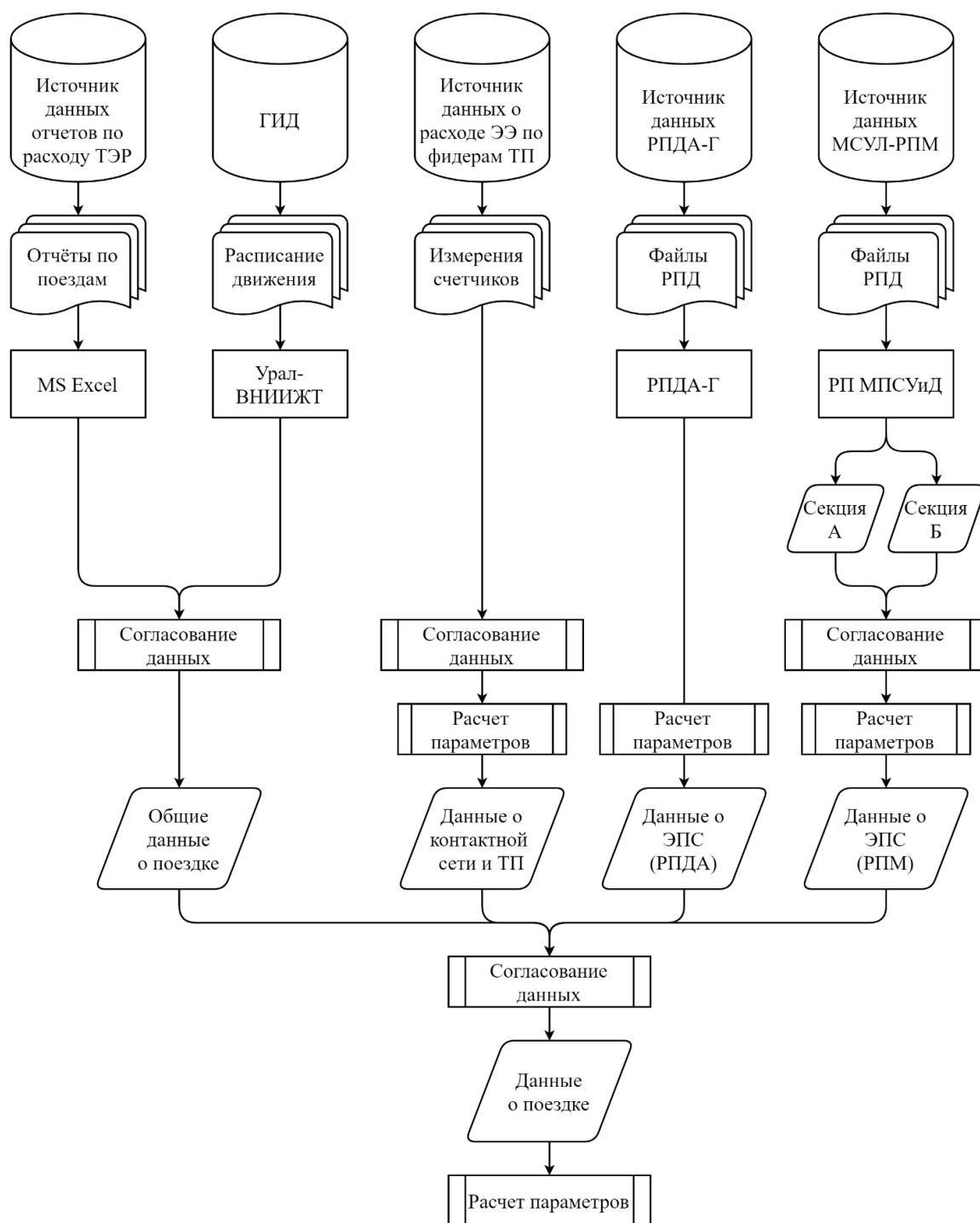


Рисунок 1 – Общая схема процесса формирования данных о поездке

Ключевые признаки, составившие описание объектов с указанием источника представлены в таблице 1.

Изменяющиеся во времени количественные признаки формируют временной ряд с периодом измерений в 1 секунду. Для анализа тяги поездов из него были отобраны только удовлетворяющие следующим условиям периоды:

Информация обо всех присутствующих на МПЗ единицах подвижного состава представлена в системе ГИД и в отчётах по расходу топлива на по номеру поезда;

Информация обо всех присутствующих на МПЗ единицах подвижного состава зафиксирована для всего периода хотя бы одним типом РПД и доступна для экспорта из файлов посредством соответствующего ПО. В случае с РПМ данное условие должно выполняться для обеих секций, а сами секции должны согласовываться между собой;

Информация о токе и напряжении зафиксирована счетчиками на всех питающих МПЗ фидерах для всего периода.

В процессе вышеназванного отбора были обнаружены следующие препятствия:

Данные с картриджей МСУЛ-РПМ считываются и передаются на хранение преимущественно перед заходом локомотива на текущий и внеплановые ремонты. Объема ПЗУ картриджа достаточно для хранения информации о, в среднем, последних 2-5 днях работы ЭПС (период зависит от интенсивности эксплуатации). При исчерпании всего объема доступной памяти РПД осуществляет перезапись наиболее старой информации. Так как период, в течение которого информация с картриджа должна быть считана, существенно меньше периода межремонтного пробега, большая её часть в итоге безвозвратно утрачивается;

Из-за отсутствия единой базы данных, для анализа были доступны только данные с картриджей локомотивов проходивших ТР или МПЗ в Омском депо;

По вышеназванным причинам, в большинстве случаев на МПЗ присутствовала хотя бы одна единица подвижного состава данные о работе которой были недоступны: либо по причине отсутствия данных с картриджа РПД либо из-за отсутствия РПД на данном подвижном составе;

Таблица 1

Описание источников ключевых анализируемых параметров

Наименование параметра	Источники данных						
	КИХ ЛП «Локомотивные парки» «Расход топлива по номеру поезда»	КИХ ЛП «Локомотивные парки» «Расход ТЭР по машинистам»	ГИД	Счетчики на фидерах подстанций	РПМ	РПДА	Данные полученные расчетным путем авторами
Номер поезда	+	—		—		+	—
Номер маршрута машиниста	+	+		—		—	—
Серия локомотива	+	+		—		+	—
Номер локомотива	+	+		—		+	—
Дата поездки	+	±		—		+	—
Табельный номер машиниста	+	—		—		+	—
Номер колонны машинистов	—	+		—		—	—
Дата явки машиниста	—	+		—		—	—
Ф. И. О. машиниста	+	+		—		—	—
Маршрут следования	—	+		—		+	—
Работа, т·км	+	—		—		—	—
Количество осей в составе поезда	+	—		—		—	—
Масса состава, т	—	—		—		+	—
Нагрузка на ось, т	—	—		—		—	—
Количество вагонов	—	—		—		+	—
Нагон опозданий, мин	+	—		—		+	—
Участковая скорость, км/ч	+	—		—		+	+
Техническая скорость, км/ч	+	—		—		+	+
Минимальная сила тяги на автосцепке, кН	—	—		—		+	—
Максимальная сила тяги на автосцепке, кН	—	—		—		+	—

Продолжение табл. 1

Минимальная тормозная сила на автосцепке, кН	—	—		—		+	—
Максимальная тормозная сила на автосцепке, кН	—	—		—		+	—
Давление в ТМ	—	—		—		+	—
Давление в ТЦ	—	—		—		+	—
Давление в УР	—	—		—		+	—
Позиция контроллера машиниста	—	—		—		+	—
Время захода на МПЗ	—	—		—		+	—
Время выхода с МПЗ	—	—		—		+	—
Время движения по МПЗ	—	—		—		+	+
Время движения в режиме тяги	—	—		—		+	+
Время движения в режиме рекуперации	—	—		—		+	+
Время движения в режиме выбега	—	—		—		+	+
Время движения в режиме пневматического торможения	—	—		—		+	+
Доля времени движения в режиме тяги	—	—		—		—	+
Доля времени движения в режиме рекуперации	—	—		—		—	+
Доля времени движения в режиме выбега	—	—		—		—	+
Доля времени движения в режиме пневматического торможения	—	—		—		—	+
Координаты местоположения при заходе на МПЗ	—	—		—		+	—

Продолжение табл. 1

Координаты местоположения при выходе с МПЗ	—	—		—		+	—
Длина пути движения по МПЗ	—	—		—		+	+
Длина пути в режиме тяги	—	—		—		+	+
Длина пути в режиме рекуперации	—	—		—		+	+
Длина пути в режиме выбега	—	—		—		+	+
Длина пути в режиме пневматического торможения	—	—		—		+	+
Доля длины пути в режиме тяги	—	—		—		—	+
Доля длины пути в режиме рекуперации	—	—		—		—	+
Доля длины пути в режиме выбега	—	—		—		—	+
Доля длины пути в режиме пневматического торможения	—	—		—		—	+
Полный расход электроэнергии ЭПС	±	±		—		±	+
Расход на тягу ЭПС	—	—		—		±	+
Возврат электроэнергии ЭПС	—	—		—		±	+
Расход на собственные нужды ЭПС	—	—		—		±	+
Норма расхода электроэнергии ЭПС	±	±		—		—	+
Результат расхода/экономии, кВт·ч	±	±		—		—	+
Отклонение от нормы, %	±	±		—		—	+
Удельный расход электроэнергии ЭПС	±	±		—		—	+

Продолжение табл. 1

Удельный расход электроэнергии на тягу ЭПС	—	—		—		—	+
Удельный возврат электроэнергии ЭПС	—	—		—		—	+
Удельный расход электроэнергии на собственные нужды ЭПС	—	—		—		—	+
Доля расхода электроэнергии на тягу ЭПС от полного расхода электроэнергии ЭПС	—	—		—		—	+
Доля возврата электроэнергии ЭПС от полного расхода электроэнергии ЭПС	—	—		—		—	+
Доля расхода электроэнергии на собственные нужды ЭПС от полного расхода электроэнергии ЭПС	—	—		—		—	+
Минимальный ток электровоза	—	—		—		+	+
Средний ток электровоза	—	—		—		+	+
Максимальный ток электровоза	—	—		—		+	+
Минимальное напряжение на токоприемнике электровоза	—	—		—		+	+
Среднее напряжение на токоприемнике электровоза	—	—		—		+	+
Максимальное напряжение на токоприемнике электровоза	—	—		—		+	+
Минимальный ток в тяговой сети	—	—		+		—	+
Средний ток в тяговой сети	—	—		+		—	+
Максимальный ток в тяговой сети	—	—		+		—	+

Окончание табл. 1

Минимальное напряжение в тяговой сети	—	—		+		—	+
Среднее напряжение в тяговой сети	—	—		+		—	+
Максимальное напряжение в тяговой сети	—	—		+		—	+
Расход электроэнергии по тяговым подстанциям МПЗ	—	—		+		—	+
Потери электроэнергии в тяговой сети	—	—		±		—	+
Доля потерь электроэнергии в тяговой сети	—	—		±		—	+
Перетоки энергии	—	—		±		—	+

Так как МСУЛ-РПМ регистрирует и записывает данные о работе секций независимо друг от друга, при отсутствии информации о хотя бы об одной секции, расчет параметров всего локомотива становится невозможным;

По этой же причине возможно рассогласование данных между секциями, когда метка времени хотя бы для одной секции записана ошибочно. Тем не менее, возможно определить величину смещения метки времени одной секции относительно другой по сопоставлению величин токов секций;

Данные счетчиков подстанций, системы ГИД, а также РПД МСУЛ-РПМ и РПДА-Г не привязаны к глобальному времени, в результате чего возможны рассогласование данных из различных источников. Это выражается, в частности в несовпадении кривых токов и напряжений, что так же может существенно снизить точность расчетов. Тем не менее возможно определить величины смещения метки времени для различных источников по сопоставлению величин токов ЭПС и подстанций;

В некоторых случаях единая поездка в РПДА-Г ошибочно разбивается на несколько фрагментов, из-за чего часть параметров (например, метка времени и пройденный путь) для второго и последующего фрагментов содержат некорректные значения. Тем не менее, возможно восстановить исходные значения путем объединения фрагментов и пересчета параметров;

РПДА-Г не фиксирует ток собственных нужд, что делает невозможным точное определение тока локомотива. По этой причине к расчетным значениям мощности локомотива было добавлено нормативное значение мощности собственных нужд электровоза 2ЭС6 согласно ПТР 2016;

МСУЛ-РПМ фиксирует величину напряжения на токоприемнике с шагом в 40 вольт, что снижает предельную точность расчетов. Ядерная оценка плотности вероятности величины напряжения из диапазона 3-4 кВ по 500 000 случайным наблюдениям с полосой пропускания 0,5 представлена на рисунке 2;

МСУЛ-РПМ и РПДА-Г фиксирует данные с непостоянной частотой. По этой причине для восстановления периода в 1 секунду используется линейная интерполяция, которая в случае низкой плотности информации может вносить ощутимые искажения в значения параметров.

Часть вышеуказанных проблем были преодолены путем дополнительной обработки данных, детальное описание которой выходит за рамки данной статьи. В результате осуществления вышеописанных процедур была сформирована матрица признаков, объектами которых выступали

проследования МПЗ подвижным составом, полностью удовлетворяющие вышеуказанным требованиям. На рисунке 3 представлен пример синхронных измерений параметров ТП и ЭПС, причем фиксация на локомотиве осуществлялась одновременно МСУЛ-РПД и РПДА-Г.

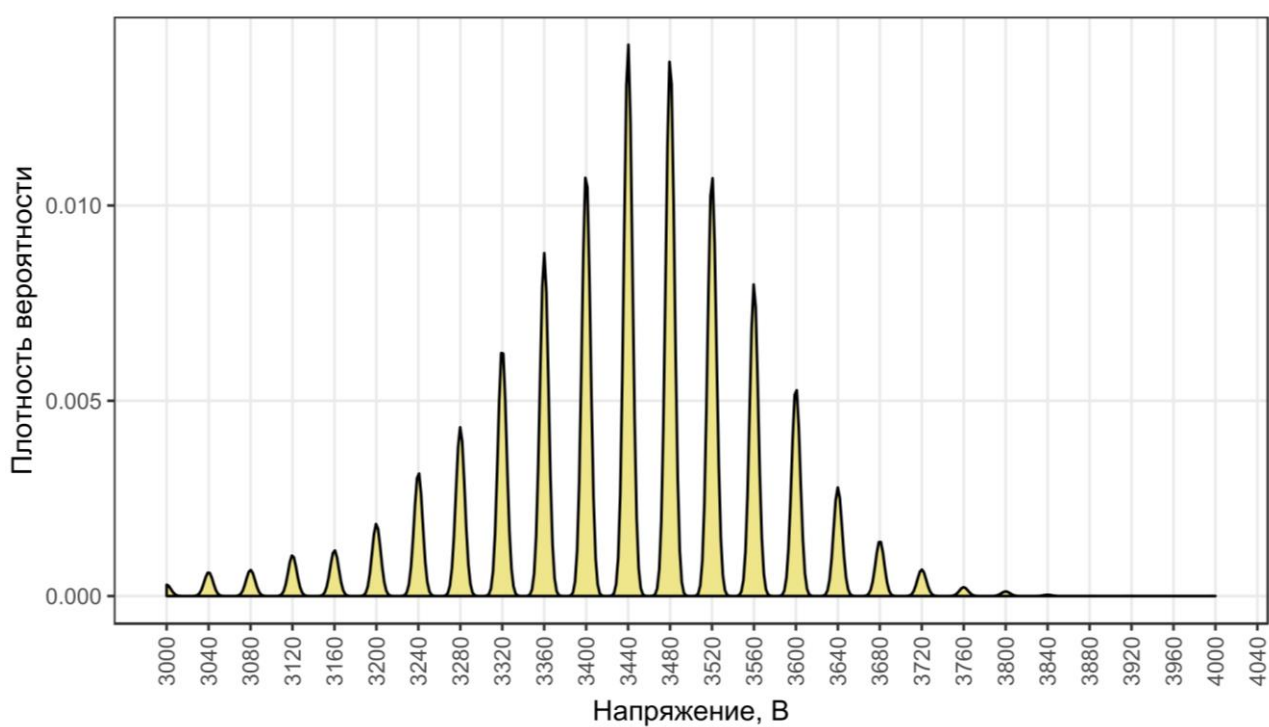


Рисунок 2 – Ядерная оценка плотности вероятности величины напряжения по данным МСУЛ-РМП

На основе полученного признакового описания возможно по фактическим данным оценить ряд ключевых параметров, например расход энергии на тягу поездов, и сравнить их с отчётными значениями, а также уточнить величину небаланса (таблицы 2 и 3).

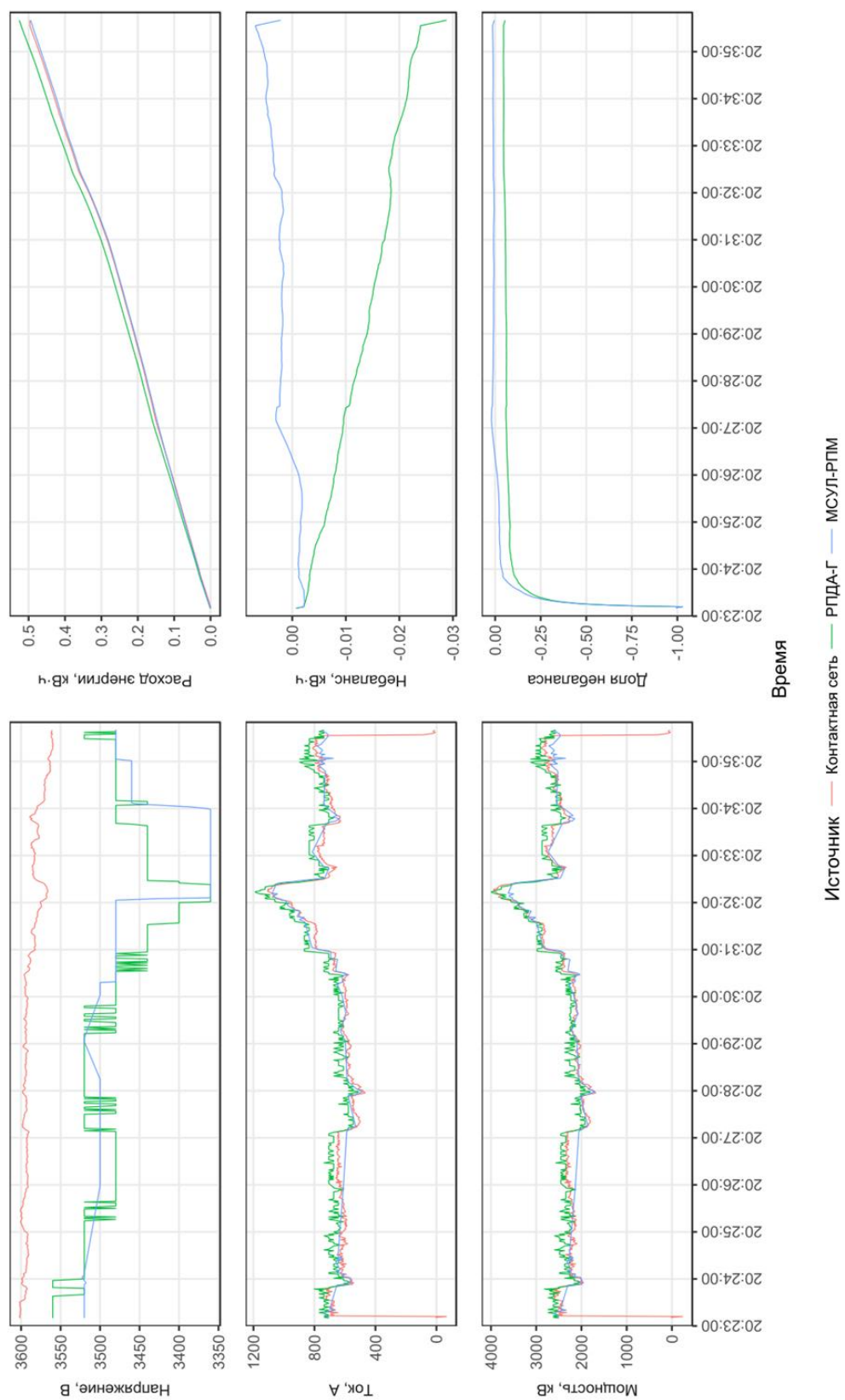


Рисунок 3 – Синхронные измерения параметров ТП и ЭПС

Таблица 2

Ключевые параметры эксплуатации электроподвижного состава и устройств
тягового электроснабжения

Наименование параметра	РПМ	РПДА-Г
МПЗ	Новоселецк - Стрела	
Номер поезда	9408	
Номер маршрута машиниста	6925	
Серия локомотива	2ЭС6	
Номер локомотива	501	
Дата поездки	15.02.2020	
Табельный номер машиниста	10435	
Номер колонны машинистов	31	
Дата явки машиниста	15.02.2020 18:19:00	
Ф. И. О. машиниста	Язов И. Н.	
Маршрут следования	Входная - Иртышское	
Работа, т·км	317	
Количество осей в составе поезда	320	
Масса состава, т	1933	
Нагрузка на ось, т	6,04	
Количество вагонов	80	
Нагон опозданий, мин	0	
Участковая скорость, км/ч	75,16	76,80
Техническая скорость, км/ч	75,16	76,80
Время движения	0:12:20	0:12:20
Длина пути движения	15,45	15,80
Полный расход электроэнергии ЭПС	487,36	518,22
Расход на тягу ЭПС	469,73	493,89
Возврат электроэнергии ЭПС	0,00	0,00
Расход на собственные нужды ЭПС	17,63	24,33
Расход электроэнергии по тяговым подстанциям МПЗ	496,47	
Потери электроэнергии в тяговой сети	9,11	-21,75
Доля потерь электроэнергии в тяговой сети	1,8%	-4,4%

Таблица 3

Сравнение энергетических параметров эксплуатации ЭПС по данным КИХ ЛП «Локомотивные парки» и систем регистрации параметров движения

Наименование параметра	РПМ	РПДА-Г	КИХ ЛП «Локомотивные парки» «Расход топлива по номеру поезда»	КИХ ЛП «Локомотивные парки» «Расход ТЭР по машинистам»
Полный расход электроэнергии	4854,72	5115,87	4990	4990
Норма расхода электроэнергии ЭПС	-	-	5274	5274
Удельный расход электроэнергии	159,21	165,12	-	157,4

Как видно из графиков и таблиц, несмотря на почти полное совпадение форм кривых мгновенных мощностей, величина полного расхода электроэнергии по данным РПДА-Г в границах МПЗ превышает аналогичные по данным подстанций и РМП, что приводит к получению отрицательных значений потерь даже без учёта расхода энергии на собственные нужды. При анализе поездки целиком полный расход электроэнергии превышает не только данные РПМ, но и отчетные величины. Данные обстоятельства вынуждают предполагать некорректность зафиксированных РПДА-Г параметров, задавая высокий приоритет оценке масштаба данного эффекта.

Тем не менее, оценка эксплуатационных показателей электроподвижного состава и устройств электроснабжения путем анализа данных онлайн мониторинга возможна, но ряд несовершенств в текущих системах учёта ограничивают предельную точность расчетов и не позволяют использовать данные без комплексной предварительной обработки.

В качестве развития данного направления исследований предлагается произвести оценку технических и коммерческих составляющих потерь электроэнергии по большей выборке корректных поездок и сравнить полученные значения с экспертными оценками.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90140.

Список литературы

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» № 466р. : утверждена Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2018. / Правительство Российской Федерации. – Москва, 2019. – 135 с. – Текст : непосредственный.
2. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года № 466р. : утверждена Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2018. / Правительство Российской Федерации. – Москва, 2018. – 19 с. – Текст : непосредственный.
3. Концепция реализации комплексного научно технического проекта «Цифровая железная дорога» № 1285р : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 05.12.2017. / ОАО «РЖД». – Москва, 2017. – 92 с. – Текст : непосредственный.
4. Черемисин, В. Т. Этапы реализации автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, Д. В. Пашков, М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 3. – С. 45-49.
5. Черемисин, В. Т. Автоматизированный мониторинг энергетической эффективности работы электроподвижного состава ОАО «РЖД» / В. Т. Черемисин, Д. В. Пашков, С. Ю. Ушаков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2014. – №3 (19). – С. 87-91.
6. Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности электроподвижного состава в границах зон учета электроэнергии железной дороги : научная монография / В. Т. Черемисин, С. Г. Истомин, С. Ю. Ушаков / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2019. – 166 с. – Текст : непосредственный.
7. Cheremisin, V. Artificial intelligence methods to control the energy efficiency of electric rolling stock online / V. Cheremisin, S. Istomin, A. Perestenko // E3S Web of Conferences. – 175, 05046 (2020). – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505046>.
8. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2019614280 РФ. Энергоконтроль ЭПС : № 2019612944 : заявлено 21.03.19 : опубликовано 02.04.19 / С. Г. Истомин, А. Е. Перестенко, К. И. Доманов ; заявитель и правообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 1 с. – Текст : непосредственный.

9. Перестенко, А. Е. Информационная модель межподстанционной зоны при внедрении комплексной системы учета электропотребления на тягу поездов / А. Е. Перестенко. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : Материалы XI научной конференции, посвященной Дню российской науки / Омский гос. ун-т. путей сообщения. – Омск, 2017. – С. 122-128.

10. Истомин, С. Г. Мониторинг и снижение потерь электроэнергии электроподвижным составом и устройствами электроснабжения / С. Г. Истомин, А. Е. Перестенко. – Текст : непосредственный // «Eltrans 10.0» : тезисы докладов Десятого международного симпозиума «Eltras 10.0», посвященного 210-летию со дня основания первого транспортного вуза России – Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. Часть первая. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2019. – С. 91-92.

11. Истомин, С. Г. Систематизация технических возможностей современных регистраторов параметров движения электроподвижного состава постоянного тока / С. Г. Истомин, А. Е. Перестенко. – Текст : непосредственный // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : материалы пятой всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т. путей сообщения. – Омск, 2019. – С. 257-261.

12. Перестенко, А. Е. Разработка цифровой модели интеллектуального управления взаимодействием электроподвижного состава и инфраструктуры железных дорог / А. Е. Перестенко, С. Г. Истомин. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2020. – С. 145-150.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Перестенко Артем Евгеньевич

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) 31-34-19.

E-mail: art-perestenko@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Perestenko Artem Evgenievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Graduate student of the department "Rolling stock of electric railways" OSTU.

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

E-mail: art-perestenko@yandex.ru.

Истомин Станислав Геннадьевич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

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

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: istomin_sg@mail.ru.

Istomin Stanislav Gennadevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the Department «Rolling stock
electric railways» OSTU.

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

E-mail: istomin_sg@mail.ru.

УДК 697.27

С. В. Глухов, М. В. Глухова, В. В. Коршунова

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

г. Омск, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРООТОПЛЕНИЯ

В данной статье представлено обоснование возможности повышения энергетической и экономической эффективности систем местного электроотопления в зданиях эксплуатируемых филиалом МРСК Сибири» - «Омскэнерго» (на примере Большеереченского РЭС). Для этого была рассмотрена эксплуатируемая в настоящее время система индивидуального электроотопления Большеереченского РЭС: рассмотрены технологии направленные на повышение эффективности индивидуальных систем отопления, в т.ч. электроотопления; произведен сравнительный анализ способов модернизации систем электроотопления с расчетом энергетической эффективности и срока окупаемости.

Ключевые слова: энергетика, эффективность, энергоснабжение, электроотопление, эксплуатация, отопление.

Sergey V. Glukhov, Maria V. Glukhova, Valeriya V, Korshunova

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

IMPROVING THE EFFICIENCY OF LOCAL ELECTRIC HEATING SYSTEMS

This article provides a justification for the possibility of improving the energy and economic efficiency of local electric heating systems in buildings operated by the branch of IDGC of Siberia-Omskenergo (on the example of Bolsherechensky RES). For this purpose, the system of individual electric heating of the Bolsherechensky RES currently in operation was considered: technologies aimed at improving the efficiency of individual heating systems, including electric heating, were considered; a comparative analysis of methods for upgrading electric heating systems was made with the calculation of energy efficiency and payback period.

Keywords: energy, efficiency, power supply, electric heating, operation, heating.

Объектом исследования выбрана производственная база Большереченского РЭС ПО СЭС филиала ПАО «МРСК Сибири» - «Омскэнерго» расположена по адресу: Омская область, р.п. Большеречье, ул. Олега Бронского, д. 1а. В своем составе имеет два отапливаемых здания: 1 – служебно-производственное здание и 2 – гараж (рисунок 1).



Рисунок 1 – Рассматриваемые здания Большереченского РЭС:

1 – административное здание; 2 – гараж

Гараж представляет собой одноэтажное здание 1990 года постройки с железобетонными стенами покрытыми сайдингом, цементным полом и мягкой кровлей на ж/б плитах. Служебно-производственное здание двухэтажное 1990 года постройки со стенами выполненными из железобетонных плит покрытые сайдингом, кровля мягкая на битумной подушке, Окна двухстворчатые. Общий вид зданий гаража и служебно-производственного здания приведен на рисунке 2



Рисунок 2 – Общий вид служебно-производственного здания и гаража

В качестве отопительных приборов в служебно-производственном здании Большереченского РЭС установлены электроконвекторы Noirot 23 шт. х 1,5 кВт, в гараже электроконвекторы Scarlett 19 шт. х 2,0 кВт. Общий вид установленного оборудования представлен на рисунок 3.



Рисунок 3 – Подключение электроконвекторов гаража и служебно-производственного здания

Электроконвекторы оснащены термостатами и эксплуатируются в режиме 24/7 на протяжении всего отопительного сезона с уставкой температуры внутреннего воздуха на уровне +16 °С. В табл. 1 представлены данные о ежемесячном потреблении электроэнергии на хозяйственные нужды служебно-производственного здания за 2019 год, в табл. 2 гаражом.

Таблица 1

Потребление электроэнергии служебно-производственным зданием

Период	январь	февраль	март	апрель	май	июнь
Потребление, кВт·ч.	38 880	33 010	14 107	13 478	4 278	3 600
Период	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Потребление, кВт·ч.	5 139	5 296	6 104	8 891	12 471	15 600

Приняв постоянное потребление на цели не связанные с обогревом помещений на уровне августа 2019 года и не учитывая период с мая по сентябрь, получим потребление электроэнергии на цели отопления за 2019 год на уровне 99 365 кВт·ч.

Таблица 2

Потребление электроэнергии гаражом

Период	январь	февраль	март	апрель	май	июнь
Потребление, кВт·ч.	25 739	33 124	14 000	-	-	-
Период	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Потребление, кВт·ч.	-	-	-	3 595	7 175	10 304

Потребление электроэнергии на цели отопления за 2019 год на составляет 116 414 кВт·ч.

1. Сравнение технологий обеспечения теплом потребителей.

Электроотопление это наиболее универсальный способ отопления к традиционным преимуществам которого относят универсальность, практически полное отсутствие необходимости обслуживания и простота регулирования [1]. К недостаткам относится – его дороговизна и ограничение мощности на вводе у потребителей, что не актуально для подразделений ПАО «МРСК Сибири» - «Омскэнерго». Так, например, принимая что 1 кВт·ч электроэнергии в январе 2019 года обходился не менее 3,92 руб (по тарифу для населения). При КПД электроконвектора на уровне 95 % получим, что стоимость 1 Гкал потребленной энергии за счет электроотопления составит 4798 руб, что сопоставимо с тарифом от центральной котельной р. п. Большеречье, но в 2 – 2,5 раза превышает тарифы теплоснабжающих организаций Омской области.

Существующие системы электроотопления гаража и служебно-производственного здания имеют следующие недостатки:

- 1) Отсутствие возможности централизованного регулирования температуры внутреннего воздуха (в т.ч. вне рабочее время);
- 2) Отсутствие возможности использования ночного тарифа на электроэнергию;
- 3) Использование тепловых конвекторов в зданиях с высотой потолков более 3 метров неэффективно, поскольку обеспечивает наиболее высокую температуру воздуха в верхней точке (под потолком) и приводит к перерасходу тепловой энергии.

Если в качестве основного ресурса для обеспечения тепловой энергии

зданий Большереченского РЭС рассматривать электрическую энергию, то существует три пути повышения экономической и энергетической эффективности при их реконструкции.

Использование тепловых аккумуляторов

Тепловой аккумулятор – это устройство для накопления тепла с целью его дальнейшего использования в системе отопления. Тепловые аккумуляторы нашли широкое применение в системах комбинированного отопления/горячего водоснабжения на основе солнечных коллекторов. Где их основная функция – это накопление тепла в световой день и его передача потребителям в вечернее и ночное время.

В существующих системах отопления зданий Большереченского РЭС использование теплового аккумулятора позволит обеспечить его эффективную зарядку в ночное время с переходом на двухтарифные или многотарифные счетчики электрической энергии с одновременным снижением температуры внутреннего воздуха вне рабочее время.

Использование тепловых насосов

Тепловой насос – это устройство для переноса тепловой энергии от источника к потребителю (системе отопления здания), который в качестве источника теплоты низкого потенциала может использовать теплоту окружающей среды (грунта, подземных воды, рек или воздуха). Наиболее распространенные виды тепловых насосов – парокомпрессионные, которые потребляют электроэнергию для привода компрессора и осуществляют перенос тепла от источника низкого потенциала (испаритель) к потребителю (конденсатор) по циклу холодильной машины [2].

Наименее затратным в монтаже тепловым насосом является – воздушный, который не требует затрат в теплообменный контур испарителя.

Описание принципа действия воздушного теплового насоса (рисунок 4):

1. Наружный воздух направляется вентилятором на теплообменник испарителя теплового насоса. В теплообменнике находится жидкий хладагент, температура которого всегда ниже наружного воздуха. При поступлении низкопотенциального тепла наружного воздуха хладагент закипает и переходит в состояние разогретого пара.

2. После этого хладагент в газообразном состоянии поступает в компрессор, где подвергается сильному сжатию. При сжатии, давление хладагента, а, следовательно, и температура среды еще больше возрастает.

Механическая энергия компрессора преобразуется в тепловую энергию.

3. Хладагент в сильно разогретом и сжатом состоянии поступает на теплообменник конденсатора, где охлаждается и отдает тепло системе отопления. При этом хладагент конденсируется и переходит в смесь жидкости и пара.

4. Для еще большего охлаждения смесь жидкого хладагента пропускается через расширительный клапан, после чего давление падает до первоначального значения и жидкий хладагент снова поступает в испаритель. Цикл повторяется.

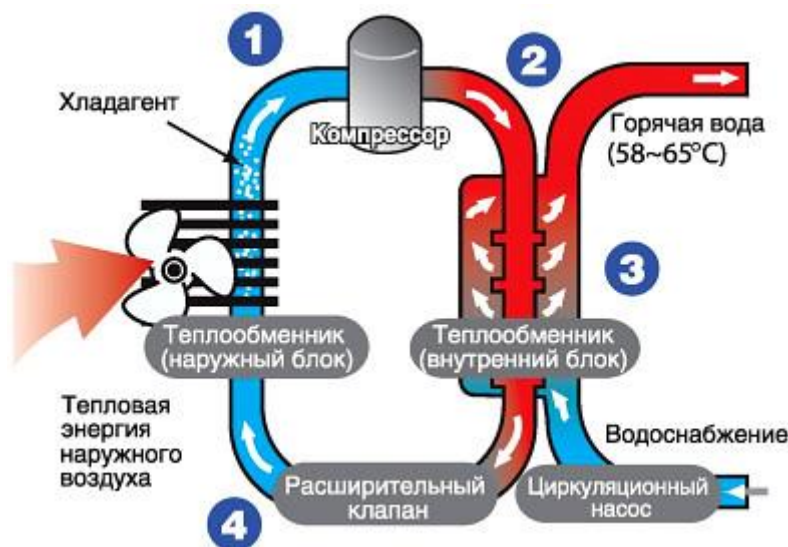


Рисунок 4 – Принцип действия воздушного теплового насоса

Существенным ограничением в использовании воздушных тепловых насосов является минимальная рабочая температура на уровне -25°C , что однако решается путем эксплуатации бивалентных систем (систем совместного использования теплового насоса и электрокотла).

Использование инфракрасных обогревателей.

К особенностям работы инфракрасных обогревателей относится, что они нагревают не воздух, а предметы которые уже передают тепловую энергию воздуху. Это позволяет осуществить более оптимальный прогрев рабочей зоны человека, снижая теплопотери по сравнению с конвективными системами отопления (рисунок 5).

Данная система, может быть рекомендована к внедрению в гараже Большереченского РЭС, ожидаемая эффективность от снижения затрат на электрическую энергию по данным производителей находится в пределах 15 % [4].

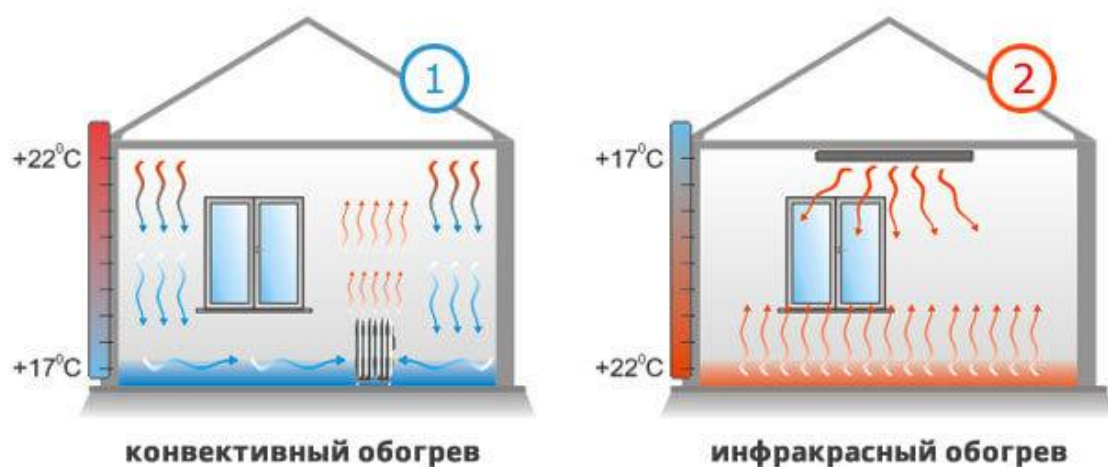


Рисунок 5 – Иллюстрация эффективности работы инфракрасных систем отопления

2. Расчет эффективности предлагаемых мероприятий.

Внедрение теплового аккумулятора. Эффективность данного мероприятия главным образом определяется использованием дешевого ночного или внепикового тарифа на электрическую энергию. Произведем расчет экономической эффективности на примере служебно-производственного здания.

1) Отапливаемая площадь здания на основе инвентаризационного паспорта здания составляет – 770 кв.м.;

2) Отопительная нагрузка укрупненно (из расчета 90 Вт/кв.м) - 69,3 кВт или 0,060 Гкал/ч;

3) Емкость теплоаккумулятора – (из расчета 50 л/1 кВт [2]) составляет 3,5 куб.м.

4) Затраты на теплоаккумулятор – составляют порядка 105 тыс.руб [2]), затраты в электродоты (2х36 кВт) – 75 тыс. руб (прайс-лист компании ЭВАН). Общие затраты с учетом реконструкции системы отопления составят порядка 400 тыс. руб.

При использовании теплового аккумулятора примем, что 70 % электрической энергии используется по ночному тарифу и 30 % по дневному. Тогда годовая экономия с учетом потребляемой энергии на уровне 99 365 кВт·ч (годовое потребление в 2019 году) и тарифов 4,67 руб/кВт·ч – дневного, 2,59 руб/кВт·ч – ночного и 4,06 /кВт·ч – одноставочного составит:

$$\Delta \text{Э} = 99\,365 \cdot 4,06 - (99365 \cdot 0,7 \cdot 2,59 + 99365 \cdot 0,3 \cdot 4,67) = 84\,062 \text{ руб.}$$

С учетом того, что 2019 год был достаточно мягким ожидаемая экономия в последующие периоды будет превышать 100 тыс. руб/год и срок окупаемости мероприятия составит 4 года.

Внедрение воздушных тепловых насосов. Опыт эксплуатации воздушных тепловых насосов в климатических условиях Урала и Сибири показывает сокращение потребления первичной энергии на 40 % при их совместном использовании с электродкотлами пикового обогрева [1].

1) Затраты в тепловые насосы (35 кВт, мощность принята в соответствии с мощностью установленных электроконвекторов) составят – 778 тыс. руб [3], затраты в электродкотлы пикового обогрева (2х36 кВт) – 75 тыс. руб (прайс-лист компании ЭВАН). Общие затраты с учетом реконструкции системы отопления 1,2 млн. руб.

2) Годовая экономия от внедрения тепловых насосов: $\Delta \mathcal{E} = 99365 \cdot 4,06 \cdot 0,4 = 161$ тыс. руб.

3) Ожидаемый срок окупаемости – 7,4 года, срок окупаемости фактически будет ниже, поскольку теплопотери зданием в 2019 году ниже среднего по данным климатических наблюдений.

Использование электроконвекторов является наиболее дешевым с точки зрения капитальных затрат способом электроотопления, и наименее эффективным с точки зрения удобства эксплуатации и энергосбережения. Его нельзя рекомендовать к использованию в зданиях с высотой потолков выше 3 метров, где большую эффективность показывают системы инфракрасного отопления.

Для зданий административных рекомендуется внедрения систем электроотопления с установкой теплоаккумуляторов или внедрения бивалентных систем на базе воздушного теплового насоса и пикового электродкотла.

Список литературы

1. Лемеш, Г. В. Способ энергоэффективного обогрева вентилируемых помещений / Г. В. Лемеш. – Текст: непосредственный // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2014. – №4 (30). – С. 42-54.

2. Гришков, А. А. Эффективность использования воздушных тепловых насосов в условиях Пермского края / А. А. Гришков. – Текст: непосредственный // АВОК. – 2014. – №3. – С. 50-54.

3. Каталог производителя тепловых аккумуляторов // Termico : сайт. – URL: <https://termico.com.ua/katalog-produktsii/teploakkumulyatory-termico/> (дата обращения: 01.12.2020). – Текст: электронный.

4. Каталог производителя воздушных тепловых насосов // Termico : сайт. – URL: <http://www.termocool.ru/catalog/vozdushnye/> (дата обращения: 01.12.2020). – Текст: электронный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Глухов Сергей витальевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: svgluk@mail.ru

Глухова Мария Викторовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: Marta_omgups@mail.ru

Коршунова Валерия Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Студентка ИЭТСЭ, гр. 47 Ж ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: lerika.1999@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lebedev Vitaly Matveyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Power system» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: svgluk@mail.ru

Glukhova Maria Viktorovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Power system» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: Marta_omgups@mail.ru

Korshunova Valeria Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Student of the Institute of electric transport and power supply systems, gr. 47 G OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-23.

E-mail: lerika.1999@mail.ru

Э. Е. Сапрыгина, А. Ю. Финиченко

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СТАЦИОНАРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В статье рассматриваются вопросы энергосбережения при использовании возобновляемых источников энергии и особенностям использования солнечных установок в системах стационарной энергетики. Оптимизация структуры общей энергетики, увеличение доли новых видов энергии, использующих возобновляемые источники, являются жизненно важными для любого государства. Одним из путей повышения энергетической эффективности использования солнечных панелей в системах стационарной энергетики и обеспечения эксплуатационной надежности системы в любых погодных условиях, является создание комбинированных систем снабжения.

Ключевые слова: энергосбережение, солнечная энергия, альтернативные источники энергии, стационарная энергетика.

Eleonora E. Saprygina, Aleksandra Y. Finichenko

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

SOLAR ENERGY EFFICIENCY IN ELECTRICAL SYSTEMS STATIONARY POWER ENGINEERING

The article discusses the issues of energy saving in the use of renewable energy sources and the peculiarities of the use of solar plants in stationary energy systems. Optimizing the structure of general energy, increasing the share of new types of energy using renewable sources are vital for any state. One way to improve the energy efficiency of solar panels in stationary energy systems and ensure the operational reliability of the system in any weather conditions is the creation of combined supply systems.

Keywords: energy conservation, solar energy, alternative energy sources, stationary energy.

На сегодняшний день в Российской Федерации в основном используются традиционные методы энергоснабжения зданий и сооружений. Это системы,

которые обеспечивают энергией различные объекты при помощи большого количества природного топлива: газа, твердого и жидкого топлива, а также электричества. Данный способ, влечет за собой большое количество затрат на потребляемые энергоресурсы, которые в свою очередь почти двукратно превосходят затраты на электроснабжение. В нашей стране, где в преобладающем числе регионов продолжительность отопительного периода составляет в среднем 7 месяцев это экономически не выгодно.

Более того, это не единственные минусы традиционной системы теплоснабжения:

- высокие затраты на транспортировку топливно-энергетических ресурсов;
- энергетические потери, снижающие КПД всей системы;
- негативное влияние на состояние экологии;
- большие эксплуатационные расходы на обслуживание системы энергокомплекса;
- частые аварийные ситуации из-за несовершенства системы;
- затраты на реконструкцию и поддержку рабочего технического состояния сетей равносильны затратам на строительство новых локальных котельных.

Но в итоге главным фактором несовершенства такой системы является истощаемость природных ресурсов.

В связи со всем вышесказанным, в последние годы во многих странах мира значительное внимание уделяется разработке и внедрению нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (НВИЭ), использующих энергию Солнца либо непосредственно (в виде излучения), либо в иных ее формах (ветер; биомасса). В ряде случаев их применение позволяет снизить стоимость вырабатываемой энергии по сравнению с традиционными энергоисточниками (особенно вдали от развитых систем электро- и топливоснабжения), уменьшить негативное воздействие объектов энергетики на окружающую среду, а также обеспечить более высокий уровень комфорта для потребителей в сельской местности.

На сегодняшний день при проектировании и строительстве солнечных электростанций важным фактором является экономическая целесообразность, так как основные потребители находятся в отдаленных районах страны и пользуются дешевой энергией на базе ископаемого топлива. Дорогая

электроэнергия – это излишняя нагрузка на бюджет страны. Эти районы децентрализованного энергоснабжения занимают примерно 60 % территории Российской Федерации и в основном располагаются в северной части страны. Если рассматривать на конкретном примере применения СЭС, то можно говорить, например, о применении возобновляемых источников энергии на Севере. В энергетическом балансе этой части страны большой процент мощностей приходится именно на экологически «грязные», органические виды топлива такие как уголь, мазут и дрова, завоз которых весьма дорог. Соответственно, все чаще поднимается вопрос экологизации северной энергетики, которая может стать более эффективной в экстремальных условиях климата. Самое оптимально и грамотно решение это сочетание возобновляемых энергоресурсов и малых атомных источников энергии, а точнее плавучих атомных теплоэлектростанций (ПАТЭС).

В 2019 году солнечная энергетика развивалась стремительнее ветровой. По итогам прошлого года общая установленная мощность СЭС превысила 650 ГВт, при этом ветрогенерация имела 645 ГВт. По мнению специалистов BloombergNEF, разрыв между солнечной и ветровой энергетикой будет увеличиваться. По прогнозам, ежегодно будет строится от 130 до 170 ГВт солнечных мощностей против 50-60 ГВт ветрогенерации. Помимо этого, эксперты говорят о том, что на ветровую и солнечную энергетику приходится более 60% всех построенных в 2019 году генерирующих мощностей в мире. Изучая рейтинг мощностей применимых видов энергетики, можно увидеть, что солнечная энергетика по показателю установленной мощности (650 ГВт) находится на 4 месте после угля (2100 ГВт), газовой генерации (1810 ГВт) , а также гидроэлектростанций (1160 ГВт). Но возможно, уже к 2030 году она сможет занять 1 или 2 строчку в этом списке.

Продолжительность солнечного сияния в Омской области с ноября по январь составляет 30 – 38% возможной, а летом возрастает до 57 – 66% за счет увеличения главным образом длительности дня (рисунок 1).

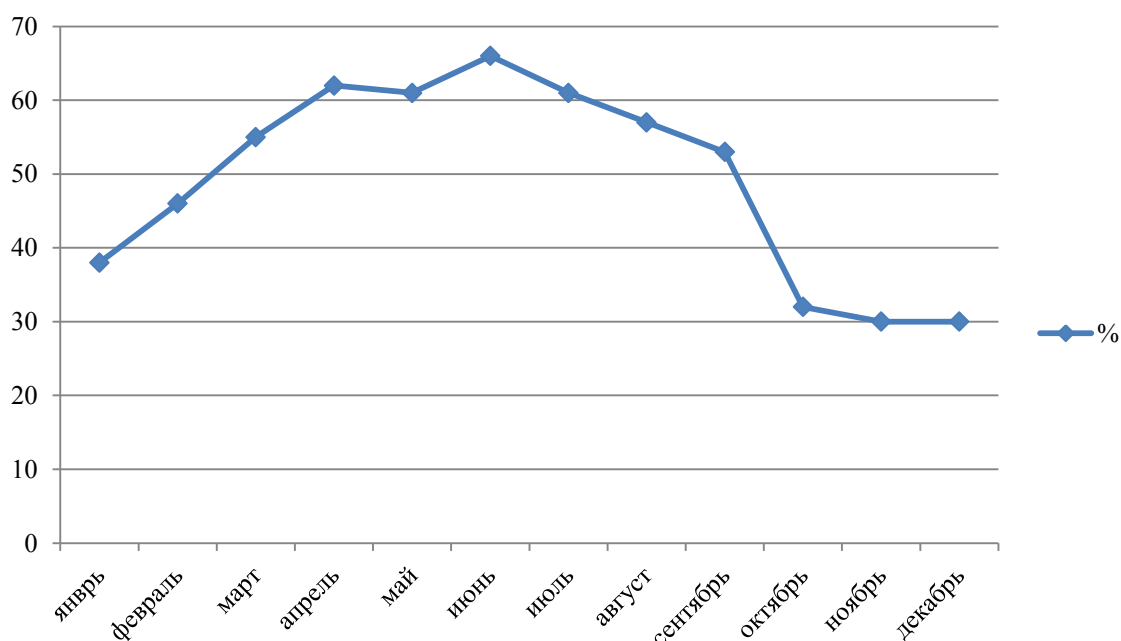


Рисунок 1 – Отношение (%) наблюдавшейся продолжительности солнечного сияния к возможной (2018 – 2019 гг.)

От высоты солнца зависит возможная интенсивность притока солнечной радиации: чем больше высота солнца, тем меньший слой атмосферы проходят солнечные лучи, тем меньше они поглощаются и рассеиваются атмосферой, поэтому интенсивность притока радиации увеличивается.

Но, тем не менее, наблюдается рост цен на энергоносители в России, что заставляет проявлять интерес к дешевым источникам энергии. То есть солнечная энергия. Энергия солнечной радиации, падающая на Землю в 10000 раз превышает количество вырабатываемой человечеством энергии. Проблемы возникают в технологии сбора энергии и в связи с неравномерностью поступления энергии на гелиоустановки. Поэтому солнечные коллекторы и солнечные батареи применяются или совместно с аккумуляторами энергии или в качестве средства дополнительной подпитки для основной энергетической установки.

Зоны максимальной интенсивности солнечного излучения (рисунке 2). На 1 квадратный метр поступает более 5 кВт/час солнечной энергии в день. По южной границе России от Байкала до Владивостока, в районе Якутска, на юге Республики Тыва и Республики Бурятия, как это не странно, за Полярным Кругом в восточной части Северной Земли. Поступление солнечной энергии от 4 до 4,5 кВт/час на 1 кв. метр в день Краснодарский край, Северный Кавказ, Ростовская область, южная часть Поволжья, южные районы Новосибирской,

Иркутской областей, Бурятия, Тыва, Хакассия, Приморский и Хабаровский край, Амурская область, остров Сахалин, обширные территории от Красноярского края до Магадана, Северная Земля, северо-восток Ямало-Ненецкого АО. От 2,5 до 3 кВт/час на кв. метр в день По западной дуге — Нижний Новгород, Москва, Санкт-Петербург, Салехард, восточная часть Чукотки и Камчатка. От 3 до 4 кВт/час на 1 кв. метр в день.



Рисунок 2 – Солнечная радиация (кВт ч/м² день)

Наибольшую интенсивность (рисунок 3) поток энергии имеет в мае, июне и июле. В этот период в средней полосе России на 1 кв. метр поверхности приходится 5 кВт. час в день. Наименьшая интенсивность в декабре-январе, когда 1 кв. метр поверхности приходится 0,7 кВт/час в день.

Если установить солнечный коллектор под углом 30 градусов к поверхности, то можно обеспечить съем энергии в максимальном и минимальном режиме соответственно 4,5 и 1.5 кВт час на 1 кв. метр в день.

Например, исходя из приведенных данных, можно рассчитать площадь плоских солнечных коллекторов, необходимую для обеспечения горячего водоснабжения семьи из 4-х человек в индивидуальном доме. Нагрев 300 литров воды от 5 градусов до 55 градусов в июне могут обеспечить коллекторы площадью 5,4 квадратного метра, в декабре 18 кв. метров. Если применить более эффективные вакуумные коллекторы, то требуемая площадь коллекторов снижается примерно вдвое.

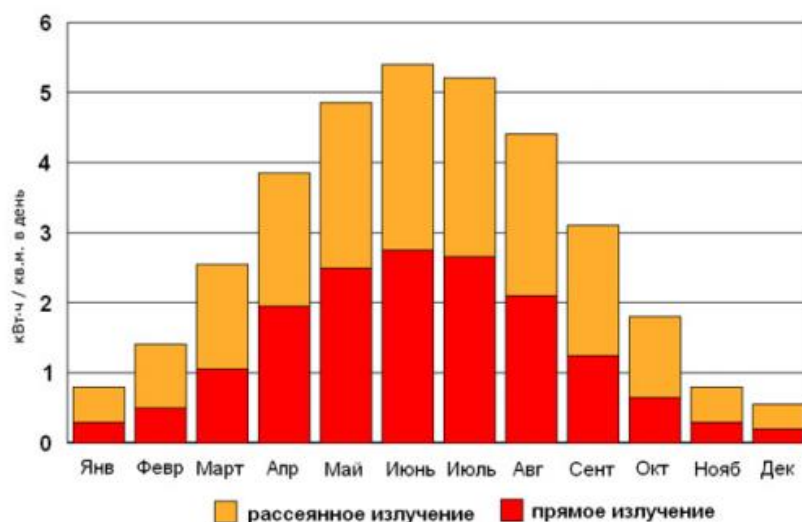


Рисунок 3 – Распределение интенсивности солнечного излучения в средней полосе России по месяцам

Для практических целей наибольшее значение имеет изучение суммарной радиации, а не отдельно прямой и рассеянной. Состав суммарной радиации, т. е. соотношение между прямой и рассеянной радиацией, может меняться в широких пределах в зависимости от высоты солнца, прозрачности атмосферы, широты места.

Увеличение прозрачности наблюдается в зимние месяцы, а ее уменьшение в летние. Такая закономерность вызвана изменением содержания в атмосфере водяного пара и аэрозолей.

На практике солнечные коллекторы желательно применять не в качестве основного источника энергии, а в качестве устройства для подогрева воды, поступающей в отопительную установку. В этом случае расход топлива резко снижается. При этом обеспечивается бесперебойная подача горячей воды и экономия средств на энергетическую составляющую дома, если это дом для постоянного проживания.

В России солнечные коллекторы пока не получили должной популярности, хотя во многих регионах страны достаточное наличие солнечного света могло бы существенно снизить затраты на обогрев помещений. Такие регионы как Забайкалье, южная часть Сибири, а также южная часть европейской части страны имеют необходимое количество солнечной радиации для выработки более дешевого тепла, чем дают традиционные источники.

Такой способ получения энергии в долгосрочной перспективе дает большую экономию природных ресурсов, и благотворно влияет на экологическую обстановку на нашей планете.

Список литературы

1. Щукина, Т. В. Солнечное теплоснабжение зданий и сооружений : монография / Т. В. Щукина / Воронеж. гос. арх.-строит.ун-т. – Воронеж, 2007. 120 с. – Текст : непосредственный.
2. Волков, А. В. Сравнение характеристик солнечных коллекторов различных типов / А. В. Волков, О. П. Ковалев. – Текст : непосредственный // Приморские зори-2005 : материалы межд. научных чтений. Вып 2. – Владивосток : ТАНЭБ, 2005. – С. 29-32.
3. Попель, О. С. Анализ показателей эффективности использования солнечных водонагревательных установок / О. С. Попель, С. Е. Фрид, Ю. Г. Коломиец. – Текст : непосредственный // Сантехника, отопление, кондиционирование. – № 5. – С. 106-107.
4. Даффи Дж. Основы солнечной теплоэнергетики / Даффи Дж., Бекман У. – Долгопр. : «Интеллект», 2013. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сапрыгина Элеонора Евгеньевна

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644000,
Российская Федерация.
Студент кафедры «Теплоэнергетика»
ОмГУПС.
Тел.: 89136384140.
E-mail: esaprygina839@gmail.com.

Финиченко Александра Юрьевна

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644000,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент
кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС.
Тел.: 8(3812) 31-06-23.
E-mail: Finichenko@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saprygina Eleonora Evgenievna

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m, Omsk, 644000,
the Russian Federation.
Student of the department of «Heat power
engineering» OSTU.
Phone: 89136384140.
E-mail: esaprygina839@gmail.com.

Finichenko Aleksandra Yurevna

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m, Omsk, 644000,
the Russian Federation.
Ph.D. in Technical Sciences, Docent
at the Department of «Heat power
engineering» OSTU.
Phone: 8(3812) 31-06-23.
E-mail: Finichenko@mail.ru.

Э.-А. Алтангэрэл

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

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ВАРИАНТ СИСТЕМЫ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ТРАНСМОНГОЛЬСКОЙ МАГИСТРАЛИ

Электрифицированная железная дорога является потребителем электрической энергии первой категории. Поэтому схема внешнего электроснабжения должна обеспечивать высокую надежность и бесперебойность питания тяговых подстанций. Рассмотрены состояние и перспективы Единой энергетической системы Монголии. Выполнена апробация технологии обеспечения согласования систем внешнего и тягового электроснабжения на примере проектирования Улан-Баторской железной дороги.

Ключевые слова: Единая энергетическая система Монголии, электрическая нагрузка (мощность), система внешнего электроснабжения, тяговые электрические расчеты, тяговые и нетяговые потребители.

Enkh-Amgalan Altangerel

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

PERSPECTIVE VARIANT OF THE EXTERNAL ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEM FOR ELECTRIFICATION THE TRANS-MONGOLIAN HIGHWAY

The electrified railway is a consumer of electric energy of the first category. Therefore, the external power supply scheme must ensure high reliability and uninterrupted power supply of traction substations. The state and prospects of the Unified Energy System of Mongolia are considered. The technology of ensuring the coordination of external and traction power supply systems was tested on the example of the design of the Ulaanbaatar Railway.

Keywords: Unified Energy System of Mongolia, electric load (power), external power supply system, traction electrical calculations, traction and non-traction consumers.

В 2002 г. правительством Монголии принята государственная программа «Единые энергетические системы Монголии», в рамках которой планируется использование возобновляемых источников энергии в сочетании с дизельными

электростанциями, что по прогнозам должно обеспечивать надежное бесперебойное питание 87 % потребителей. На рисунке 1 показано, как изменялась протяженность линий электропередачи (ЛЭП) в процессе модернизации энергетической системы. В значительной степени рост протяженности ЛЭП связан с принятием Программы развития «Единая энергетическая система Монголии».



Рисунок 1 – Прирост протяженности линий электропередачи на территории Монголии

Основные потребители электроэнергии приведены на рисунке 2. Наибольший объем потребляемой электроэнергии приходится на центральную энергосистему – 5552 млн кВт·ч. Восточная энергосистема потребляет всего 255 млн кВт·ч, т. к. потребителями являются только аймаки Дорнод и Сухэ-Батор. Южная энергосистема страны потребляет 1194 млн кВт ч, область Алтай – 68 млн кВт ч, а Западная область страны потребляет около 146 млн кВт ч электроэнергии.

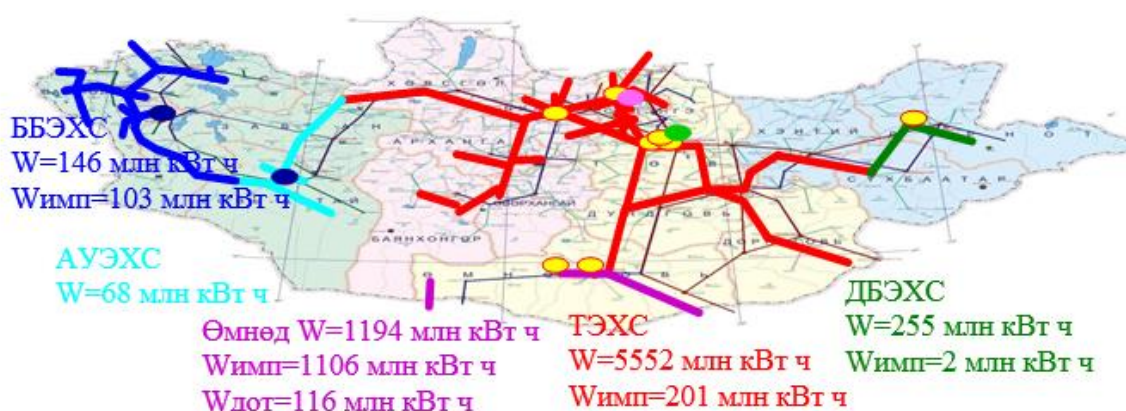


Рисунок 2 – Структура потребления электроэнергии по энергосистемам Монголии

По прогнозам университета науки и технологий Монголии к 2025-2030 гг. электрическая нагрузка (мощность) и электропотребление центральной электрической системы (ЦЭС) увеличится более чем в два раза и составит 2000 – 2200 МВт и 10 млрд. кВт·ч соответственно [1].

Единая энергетическая система Монголии увеличивает объем выработки электроэнергии. Центральное диспетчерское управление прогнозирует, что после 2020 года тенденция в балансе электроэнергии энергосистемы изменится (рисунок 3) и установленная мощность будет соответствовать потребляемой [2].

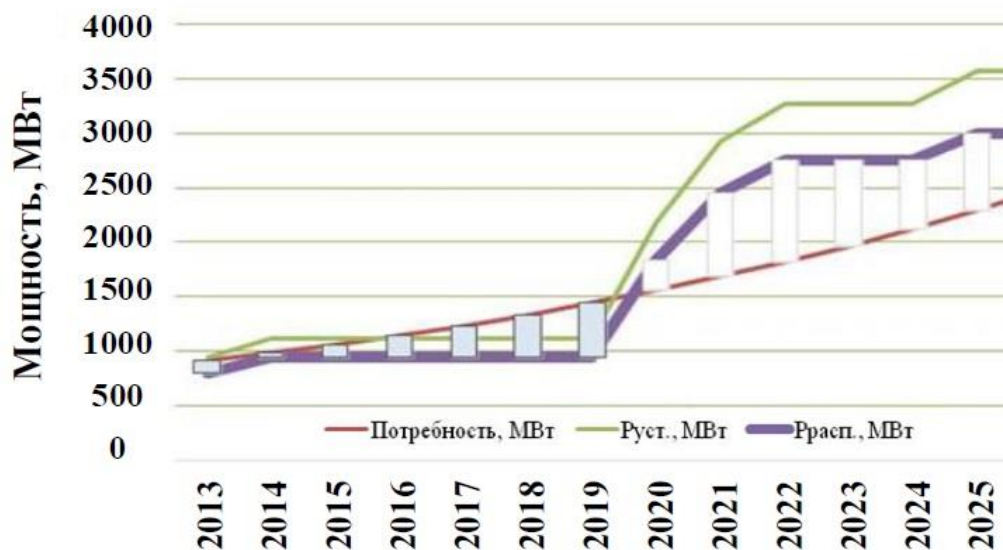


Рисунок 3 – Тенденция производства и распределения электрической мощности

К 2025 г. объем генерируемой мощности составит 3000 МВт и превысит текущее значение на 1000 МВт. При этом учтено, что к этому времени будет действовать однопутная железная дорога переменного тока, электрифицированная по системе 25 кВ.

Трансмонгольская магистраль Сухэ-Батор – Замын-Удэ имеет холмистый (перевалистый) профиль пути с подъемами крутизной до 15-17 % на перегоне Толгойт – Эмээлт и спусками крутизной до 10-11 % в нечетном направлении как в грузовом, так и в негрузовом движении. Грузопоток в грузовом движении принят равным 73,7 млн т; коэффициент годовой неравномерности – 1,32. Перевозки осуществляются поездами унифицированной для всего направления массы, равной 5000 т. Только на участке Зуунхараа – Улан-Батор в четном направлении масса поезда составляет 4500 т, в нечетном направлении – 4000 т из-за резкого подъема на участке Улан-Батор – Зуунхараа. Пассажирское движение осуществляется поездами массой 1500 т. Общие размеры движения на участке

Сухэ-Батор – Замын-Удэ и обратно за расчетный срок приведены в таблице 1.

Таблица 1

Общие размеры движения на участке Сухэ-Батор – Замын-Удэ

Участок	Сухэ-Батор – Замын-Удэ				Замын-Удэ – Сухэ-Батор			
	Грузовые 5000 т	Грузовые 4500 т	Пассажиры 1500 т	Всего	Грузовые 5000 т	Грузовые 4000 т	Пассажиры 1500 т	Всего
Сухэ-Батор – Дархан	22	-	-	22	17	-	3	20
Дархан – Зуунхараа	21	-	-	21	18	-	2	20
Зуунхараа – Улан-Батор	-	18	3	21	-	17	1	18
Улан-Батор – Чойр	20	-	1	21	19	-	1	20
Чойр – Сайншанд	18	-	1	19	19	-	1	20
Сайншанд – Замын-Удэ	22	-	1	23	19	-	1	20

Питание тяговых подстанций электроэнергией предусматривается от двухцепной продольной ЛЭП напряжением 110 кВ. В качестве опорных питающих пунктов используются подстанции 220/110 кВ в узлах Сухэ-Батор и Дархан, Зуунхараа и Улан-Батор, Чойр и Сайншанд. Ввиду отсутствия опорной точки в узле Сайншанд предусматривается, что тяговая подстанция в данном узле или вблизи него должна являться опорной с питающим напряжением 220 кВ и распределительным устройством 110 кВ, к которому будут подключены линии 110 кВ, отходящие в сторону Замын-Удэ по плану развития энергосистемы Монголии.

Основные показатели расчета системы электроснабжения (результаты тяговых электрических расчетов) приведены в таблице 2. Там же показаны типы электропоездов, для которых произведен расчет (2ЭС5К для грузовых поездов и ЭП-20 – для пассажирских).

Средняя величина линейной нагрузки при максимальных объемах перевозок 57,5 кВ·А·ч/км, полученная для рассматриваемого участка на основе данных таблицы 2, позволяет определить оптимальное расстояние между тяговыми подстанциями с помощью программы. Это расстояние составит 47,2 км, что соответствует размещению на магистрали 24 подстанций.

Все подстанции будут иметь питающее напряжение 110 кВ. Подстанция

Дархан, Зуунхараа, Улан-Батор, Чойр, Сайншанд, Замын-Удэ – опорные, остальные подстанции проходного, отпаечного и тупикового типов. Все тяговые подстанции совмещены с дистанциями контактной сети.

Таблица 2

Результаты тягового электрического расчета на участке
Сухэ-Ба-тор – Замын-Удэ (Трансмонгольская магистраль)

Подстанции	Пункт, км	Длина между ТПС, км	Полный расход электроэнергии, кВт·А·ч	Активная электроэнергия, кВт·ч		Реактивная электроэнергия, квар·ч		Потери в трансформаторах	
				прием	возвр.	прием	возвр.	нагруз.	х. х.
Сухэ-Батор	23	50	18350	16807	156	8262	551	12	1512
Орхон	73	48	27321	24346	169	12725	0	19	1512
Дархан	121		9394	7001	147	6454	0	4	1512
Всего по участку			55065	48154	472	2741	551	35	4536
Дархан	121	47	30448	28428	129	12471	1236	29	1512
Эрхэт	168	63	56383	48155	67	29438	0	54	1512
Зуунхараа	231		35321	28996	98	20310	0	38	1512
Всего по участку			122153	105579	294	62220	1236	121	4536
Зуунхараа	231	40	33053	29561	333	16611	1176	35	1512
Тунх	274	40	59076	43655	1611	41501	0	70	1512
Мандал	314	55	64907	53496	504	37623	143	81	1512
Давааны	369	24	60853	52292	2221	35241	656	100	1512
Улан-Батор	403		29161	18417	3121	24827	0	40	1512
Всего по участку			247050	197421	7791	155802	1975	327	7560
Улан-Батор	403	56	39509	34185	770	22123	1043	47	1512
Хайрхан	459	50	87902	65667	727	59242	0	145	1512
Багахангай	509	47	68664	53373	1485	45174	203	108	1512
Агуйт	546	52	49550	43864	170	24111	743	48	1512
Оорцог энгэр	598	47	50440	39826	398	31459	0	50	1512
Чойр	645		26227	23931	270	12563	1246	26	1512
Всего по участку			322293	260845	3820	194672	3235	423	9072
Шивээ Овоо	671	57	59918	39415	2931	47531	1	92	1512
Цомог	728	52	73563	55824	964	49214	204	124	1512
Алтганы гол	780	64	69239	55731	882	42468	212	83	1512
Агь Сумбэт	844	32	59263	42781	2797	43743	1	72	1512
Сайншанд	876		28339	26441	1205	14516	1623	33	1512
Всего по участку			313581	243077	9936	208152	4420	429	9072
Сайншанд	876	29	24243	22582	1158	13125	1179	25	1512
Тушлэг	905	59	51478	38005	2410	37188	0	65	1512
Долоодын хундий	964	54	57651	4723	427	33810	153	70	1512
Цагаанхад	1018	51	56407	47000	565	32203	179	67	1512
Нартынхошуу	1069	42	48031	38889	618	29024	0	44	1512
Замын-Ууд	1111		25852	24200	3	10306	1206	21	1512
Всего по участку			263663	217909	5180	155656	3317	291	9072

Система внешнего электроснабжения представляет собой одноцепную ЛЭП АС 300/39. Длины участков ЛЭП между подстанциями приведены на рисунке 4.

Система тягового электроснабжения содержит 24 тяговые подстанции, оборудованные одинаковыми трехобмоточными тяговыми трансформаторами типа ТДТН 40000/220 с номинальными напряжениями обмоток 230/27,5/6 кВ. Контактная подвеска на исследуемом участке выполнена контактным проводом МФ-100 и несущим тросом ПБСМ1-95. Участок однопутный. Рельсы типа Р65 расположены над однородной структурой земли с проводимостью $\gamma = 10^{-4}$ См/м. Расстояние между тяговыми подстанциями составляет 26 – 57 км.

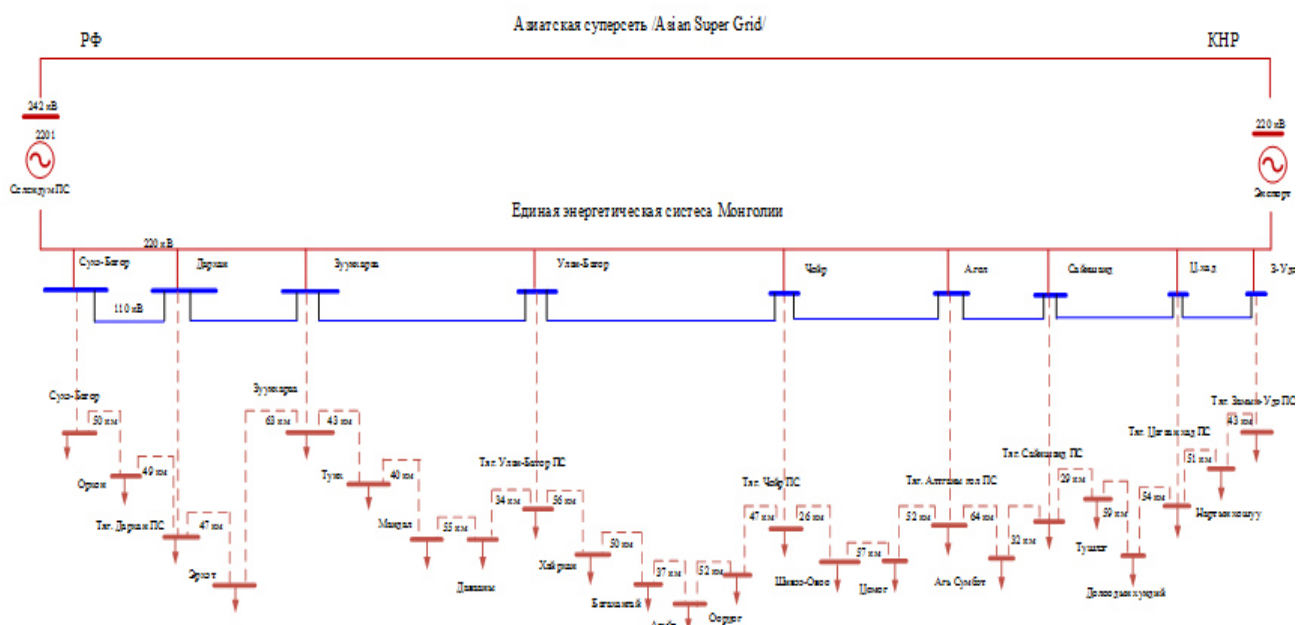


Рисунок 4 – Расчетная электроэнергетическая система

На рисунке 5 представлена разработанная на перспективу система внешнего электроснабжения для питания тяговых и нетяговых потребителей Монголии на напряжение 110-220 кВ. В связи с присоединением тяговой электрической сети учтены проекты по реконструкции и расширению электрических систем Монголии, в том числе реконструкции Дархан ТЭЦ, Эрдэнэт ТЭЦ, ТЭЦ-3 и ТЭЦ-5 г. Улан-Батор мощностью 250 МВт и 450 МВт, Экспортной ТЭЦ в г. Сайншанде и т. д.

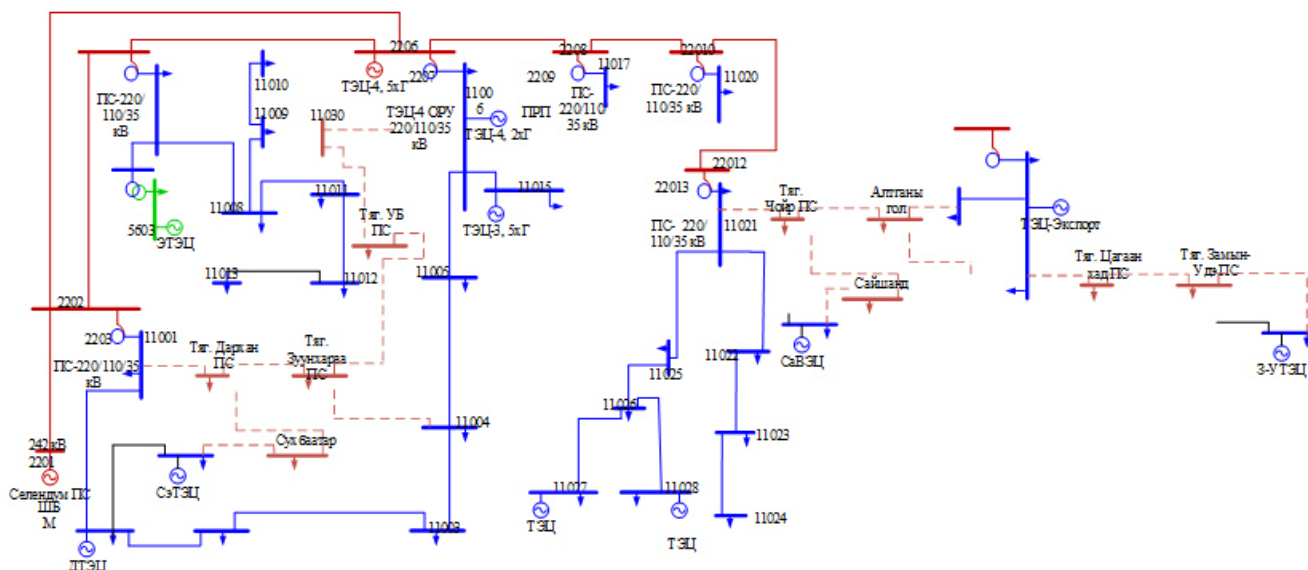


Рисунок 5 – Разработанная схема перспективного варианта системы внешнего электроснабжения для питания тяговых и нетяговых потребителей Монголии

Всего планируется присоединить к проектируемым подстанциям на напряжение 110 кВ на северном участке – пять, на центральном участке – десять, на южном участке – девять тяговых подстанций.

Список литературы

1. Эрчим хучний яам : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://energy.gov.mn/> (дата обращения: 22.11.2020).
2. Борисова, Г. О. О перспективах развития рынка электроэнергии в Монголии и возможности параллельной работы энергосистем Забайкалья и Монголии / Г. О. Борисова. – Текст : электронный // Бесплатная научная электронная библиотека: сайт. – URL: <http://av.disus.ru/programma/1164706-1-1-doklad-sns-orei-bnc-ran-ken-borisova-perspektivah-razviti-ya-rinka-elektroenergii-mongolii-vozmozhnosti-parallelnoy-raboti-energo.php> (дата обращения: 22.11.2020).
3. Энхжаргал, Х. Перспективные направления развития электроэнергетической системы Монголии / Х. Энхжаргал, С. Батмунх, В. А. Стенников. – Текст : непосредственный // Энергетическая политика. – 2012. – № 4. – С. 70-82.
4. Китушин, В. Г. Модель годового планирования работы генерирующих компаний на конкурентном рынке электроэнергии / В. Г. Китушин, Б. Бат-Очир. – Текст : непосредственный // Экономика и предпринимательство. – 2016. – № 3-2 (68). – С. 822-825.

5. Бумцэнд, У. Развитие и оптимизация режимов электроэнергетической системы при электрификации железнодорожной магистрали (на примере электроэнергетической системы Монголии): специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бумцэнд Уянгасайхан; Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2018. – 186 с. – Текст : непосредственный.

6. Сивков, А. А. Основы электроснабжения: учебное пособие / А. А. Сивков, А. С. Сайгаш, Д. Ю. Герасимов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 184 с. – Текст : непосредственный.

7. Черемисин, В. Т. Совершенствование методов расчета режимов приема и потребления электрической энергии в условиях несимметрии и несинусоидальности электротяговой нагрузки переменного тока: специальность 05.22.09 «Электрификация железнодорожного транспорта»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Черемисин Василий Титович; Омская гос. акад. путей сообщения. – Омск, 1996. – 444 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Алтангэрэл Энх-Амгалан
Локомотивное депо Улан-Батор,
АО «УБЖД».
Сеул-42 ул., г. Улан-Батор, 210535,
Монголия.
Инженер-эксперт.
Тел.: +976 86119909.
E-mail: enkhamgalan0203@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Altangerel Enkh-Amgalan
Ulaanbaatar Locomotive Depot , JSC "UBZhD".
Seoul-42 st., Ulaanbaatar, 210535, Mongolia.
Expert engineer.
Phone: +976 86119909.
E-mail: enkhamgalan0203@gmail.com

Научное издание

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ
И НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА

Материалы четвертой международной
научно-практической конференции
(10 декабря 2020 г.)

Посвящается 75-летию победы в Великой Отечественной войне
85-летию кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта»
120-летию Омского государственного университета путей сообщения

Ответственный за выпуск Е. В. Пономарев

* * *

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 21.12.2020. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$.
Плоская печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 18,2. Уч.-изд. л. 12,6.
Тираж 300 экз. Заказ

* *

Типография ОмГУПСа

*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35