

На правах рукописи



Луковенко Антон Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Красноярск – 2016

Работа выполнена на кафедре «Системы обеспечения движения поездов» Красноярского института железнодорожного транспорта – филиала ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Христинич Роман Мирославович

Официальные оппоненты: **Чижма Сергей Николаевич** – доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения», кафедра «Автоматика и системы управления», заведующий кафедрой

Бастрон Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет, кафедра «Электроснабжение сельского хозяйства», заведующий кафедрой

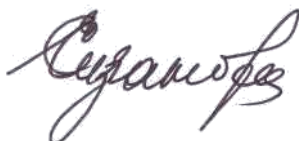
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет водного транспорта»

Защита состоится «28» сентября 2016 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, д. 70, ауд. А – 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «___»_____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность научной работы. Система электроснабжения железной дороги является одним из её основных комплексных элементов, во многом определяющим пропускную способность и надежность железнодорожного транспорта, а следовательно, во многом определяющим реализацию стратегии развития железных дорог России.

Система электроснабжения включает в себя линии электропередач, контактную сеть, питающую и отсасывающую линии, рельсовый путь, силовую подстанцию.

Уровень надежности системы тягового электроснабжения (СТЭ) непосредственно влияет как на безопасность движения поездов, так и на бесперебойность движения поездов, что особенно важно при прохождении тяжеловесных составов, так как значительно возрастают токовые нагрузки и становятся выше номинальных значений.

В связи с этим к надежному функционированию системы тягового электроснабжения предъявляются особые требования по надежности, исключающие аварийные ситуации. Надежность такого оборудования определяется следующими свойствами: вероятностью безотказной работы, техническим ресурсом оборудования и его элементов, ремонтпригодностью оборудования, качеством электроснабжения.

Повышение надежности, эффективности работы, продолжительности сроков эксплуатации, качества электроэнергии в системе тягового электроснабжения во много раз уменьшает экономические потери от простоя оборудования и снижает затраты на ремонты.

Основные положения диссертационной работы находятся в рамках плана научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги» на 2013-2015г. и соответствуют направлениям: «Разработка системы диагностики силовых трансформаторов в режиме реального времени», «Разработка интеллектуальной системы тягового электроснабжения переменного тока 1×25 кВ», «Разработка системы диагностики коммутационного оборудования тяговых подстанций».

Вопросам надежного функционирования и эффективной эксплуатации системы тягового электроснабжения посвящены работы ученых: Бардушко В.Д., Гука Ю.Б., Крюкова А.В., Закарюкина В.П., Львова Ю.Н., Марквардта К.Г., Молина Н.И., Пантелеева В.И., Тихомирова П.М., Фигурнова Е.П., Христиничка Р.М., Худоногова А.М., Черемисина В.Т., Чижмы С.Н. и других. Известные работы не содержат готовых методик, позволяющих учесть комплекс-

ное влияние функционально не связанных параметров на надежное и эффективное функционирование СТЭ и качество электроснабжения при повышенных тяговых нагрузках.

Обеспечение надежного и эффективного функционирования системы тягового электроснабжения, повышение качества электроснабжения потребителей тяговых подстанций переменного тока при увеличении пропускной способности и прохождении составов повышенной массы, разработка методики расчета надежности СТЭ являются актуальными задачами.

Цель исследования: теоретическое обоснование технических решений для повышения качества электроэнергии и эффективности работы системы тягового электроснабжения, основанных на учёте взаимосвязи технического состояния и режимов работы силовых трансформаторов тяговых подстанций на различных этапах их жизненного цикла.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Выявлены причины повреждаемости силовых трансформаторов тяговых подстанций при предельных тяговых нагрузках и проведен анализ современных методов и способов их диагностики.

2. Построена математическая модель надежности повреждаемости силового трансформатора тяговой подстанций, учитывающая взаимосвязи его технического состояния и режимов работы на различных этапах его жизненного цикла.

3. Разработана методика расчета системы «симметрирующее устройство – фильтрокомпенсирующее устройство» и выявлены границы ее применения при определении качества напряжения системы тягового электроснабжения.

4. Создана методика прогнозирования режимов работы силового оборудования системы тягового электроснабжения на основе комплексного использования системы «Нейронная сеть – КОРТЭС».

5. Разработаны практические рекомендации по повышению надежности и эффективности силового оборудования и качества напряжения системы тягового электроснабжения.

Объект исследования: система тягового электроснабжения.

Предмет исследования: надежность системы тягового электроснабжения и качество электроснабжения потребителей тяговых подстанций.

Методы исследований. Поставленные задачи решены современными методами теории вероятности с использованием методов теории надежности, методов прогнозирования и математической статистики, нейросетевого модели-

рования, методов теории электрических цепей и электроснабжения, экспериментальных исследований.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Предложена математическая модель повреждаемости силового трансформатора тяговой подстанции, учитывающая техническое состояние и электрические тяговые нагрузки на различных этапах его жизненного цикла.

2. Установлены математические зависимости системы «симметрирующее устройство-фильтрокомпенсирующее устройство», позволяющие определить параметры качества электроэнергии для эффективной работы системы тягового электроснабжения.

3. Выявлены взаимосвязи и характер влияния параметров и режимов работы системы тягового электроснабжения на надежность и эффективность силовых трансформаторов.

4. Разработана методика прогнозирования режимов работы силового оборудования на основе комплексного использования системы «Нейронная сеть – КОРТЭС», позволяющая определить номинальные параметры системы тягового электроснабжения при прохождении составов повышенной массы.

Достоверность результатов. Достоверность полученных научных результатов, изложенных в работе, определяется строгим обоснованием расчетных методик и принимаемых допущений, корректным применением современных методов научных исследований, удовлетворительным совпадением расчетных результатов с экспериментальными данными, полученными на действующем промышленном оборудовании. Все разделы работы логически взаимосвязаны, а выводы и рекомендации органически вытекают из материалов теоретических и экспериментальных исследований.

Реализация полученных результатов. Результаты исследований диссертационной работы используются для повышения надежности силового оборудования и улучшения качества электроснабжения потребителей тяговых подстанций Красноярской железной дороги (КрасЖД), а также для увеличения срока безаварийной эксплуатации оборудования районных подстанций публичного акционерного общества «Межрегиональная распределительная сетевая компания Сибири» (ПАО «МРСК Сибири»). Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс Красноярского института железнодорожного транспорта – филиала ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» и используются при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам «Электроснабжение железных дорог», «Электропитание и электроснабжение нетяговых потребителей», «Основы технической диагностики», а

также в курсовом и дипломном проектировании. Использование результатов диссертационной работы подтверждено соответствующими актами.

Практическая значимость:

1. Разработана методика расчета вероятности отказов силового оборудования – трансформаторов, высоковольтных выключателей тяговых подстанций, которая позволяет определить время их безаварийной работы в условиях неопределенности.

2. Создан способ расчета комплексной системы «симметрирующее устройство – фильтрокомпенсирующее устройство», позволяющий определить оптимальные параметры фильтрокомпенсирующего устройства для снижения влияния высших гармоник и повышения качества электроснабжения потребителей тяговых подстанций.

3. Разработан алгоритм и предложена методика расчета надежности элементов силового трансформатора тяговой подстанции на основе системы «Нейронная сеть – КОРТЭС».

4. Разработаны и обоснованы практические рекомендации по повышению надежности системы тягового электроснабжения Красноярской железной дороги при прохождении тяжеловесных составов.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель надежности силового трансформатора, учитывающая техническое состояние и электрические тяговые нагрузки на различных этапах его жизненного цикла.

2. Математические зависимости системы «симметрирующее устройство-фильтрокомпенсирующее устройство», позволяющие определить параметры качества напряжения для эффективной работы системы тягового электроснабжения.

3. Методика диагностики и прогнозирования режимов работы силового оборудования системы тягового электроснабжения на основе комплексного использования системы «Нейронная сеть – КОРТЭС».

4. Система комплексного анализа режимов работы тягового электроснабжения с учетом эффективности работы силовых трансформаторов в критических режимах, что позволяет повысить их надежность и увеличить период безаварийной эксплуатации.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно – практических конференциях: Международная научно-практическая конференция «Проблемы и достижения в науке и технике», 7 мая 2015 г., Омск; Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития технических наук», 6 июля 2015 г., Челя-

бинск; I международная конференция «Актуальные проблемы науки XXI века», 5 августа 2015 г., Москва; I, II международная научно-практическая конференция «Технические науки – от теории к практике», 18 октября 2015 г., Санкт-Петербург; Международная молодежная научно-практическая конференция: «Наука третьего тысячелетия», 20 декабря 2015 г., Нефтекамск; Международная молодежная научно-практическая конференция «Проблемы теории и практики современной науки», 20 февраля 2016 г., Минск; Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «120 лет железнодорожному образованию в Сибири», 23-24 сентября 2014 г., Красноярск; II научно-практической конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современное состояние и перспективы развития транспортной системы России», 19 февраля 2016 г., Иркутск.

Публикации: основное содержание и результаты исследований опубликованы в 13 печатных трудах, в т.ч. 4 статьи – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. В каждой работе, опубликованной в соавторстве, личный вклад автора составляет не менее 50 %.

Личный вклад автора. Состоит в создании и разработке модели прогнозирования надежности силового трансформатора, которая позволит обеспечить переход от планово-предупредительного ремонта к ремонту по техническому состоянию, что способствует уменьшению затрат на содержание морально устаревшего оборудования; математической модели «симметрирующее устройство – фильтрокомпенсирующее устройство», позволяющей выработать рекомендации по загрузке (разгрузке) тягового электроснабжения при прохождении составов повышенной массы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, 7 выводов, 5 приложений, библиографического списка из 110 наименований на 13 страницах и содержит 153 страницы основного текста, 43 рисунка, 27 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертации, а так же определены методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе рассмотрен анализ надежности силового оборудования системы тягового электроснабжения и влияние качества электроэнергии на его работу, систематизированы причины отказов основного электротехнического оборудования, системы тягового электроснабжения, определены основные по-

казатели качества электроэнергии и показано влияние качества электроэнергии на надежность силового оборудования.

Надежность системы тягового электроснабжения зависит как от надежности отдельных узлов трансформаторов, автоматических выключателей, разъединителей, ограничителей перенапряжений, так и от взаимного влияния силового оборудования друг на друга.

Основным элементом системы электроснабжения, выполняющим функцию преобразования напряжения для последующей передачи и распределения электроэнергии в узлах нагрузки, является силовой трансформатор (СТ), выход из строя которого приводит к тяжелым последствиям для системы тягового электроснабжения.

Основываясь на данных статистики, наиболее повреждаемой частью СТ является обмотка – 52%, повреждаемость вводов – 27% и прочее 21%. Процент повреждения обмоток распределяется по ее элементам следующим образом: главная изоляция–12%, витковые и межвитковые замыкания–28%, термические и динамические воздействия – 12% и прочие повреждения – 48% (рис.1).

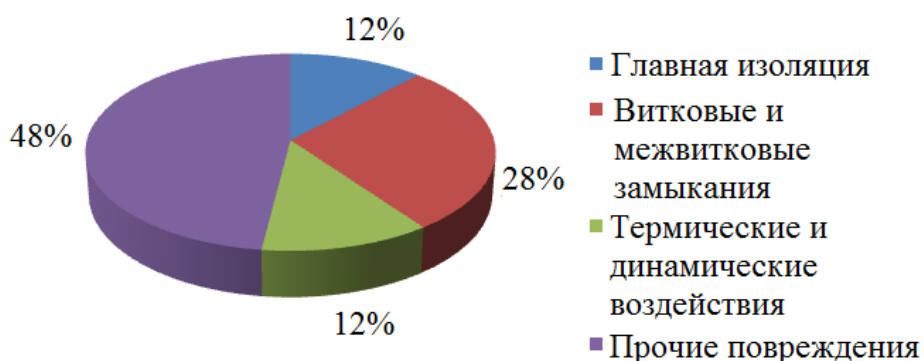


Рисунок 1 – Процент повреждаемости обмоток СТ

В настоящее время, в частности на Красноярской железной дороге, доля трансформаторов, выработавших нормативный срок, составляет около 50%, из них 13%

проработали более 40 лет. Наиболее повреждаемой частью силовых трансформаторов является обмотка – 52%, повреждаемость вводов составляет 27%. Надежность работы силового трансформатора, особенно выработавшего нормативный срок, напрямую зависит от раннего обнаружения развивающихся дефектов.

Основным показателем надежной работы силового оборудования тяговой сети является удовлетворяющее нормам качество электроэнергии, которое определяется характером нагрузки и режимами работы тяговых потребителей.

Для повышения тяговой загрузки силового электрооборудования подстанций необходимо снизить реактивную мощность в сети и уменьшить величину высших гармоник, генерированных тяговыми потребителями.

Создание и использование математических моделей прогнозирования повреждений узлов и систем силового оборудования системы электроснабжения

является одним из перспективных направлений решения задач повышения его надежности на всех этапах существования: проектирования, изготовления, эксплуатации.

Анализ эксплуатации силового электрооборудования системы тягового электроснабжения позволяет сделать вывод о целесообразности исследования в следующих направлениях: изучение процессов и особенностей работы силового электрооборудования при предельных тяговых нагрузках, приводящих к зарождению повреждения, развитию и достижению его критического уровня; разработка математических моделей надежности оборудования системы тягового электроснабжения на стадии эксплуатации, что обеспечивает решение ряда задач, таких как обоснование оптимальной долговечности оборудования, снижение его энергоемкости, повышение производительности; применение математической модели прогнозирования повреждений является отправной точкой в решении задач, связанных с надежностью работы оборудования при повышенных нагрузках и предельных режимах работы; разработка новых комплексных систем и устройств симметрирования нагрузки, компенсации реактивной мощности и снижения уровня высших гармоник с целью повышения надежности и эффективности существующих систем тягового электроснабжения и разработке более прогрессивных систем.

Во второй главе представлены математические модели надежности элементов системы электроснабжения: аналитическая модель надежности силового трансформатора на основе квантилей распределения, численная модель надежности силового электрооборудования подстанций на основе нейронных сетей, расчетная комплексная модель несимметричных режимов тяговой сети и системы «симметрирующее устройство-фильтрокомпенсирующее устройство».

Исследуя парк трансформаторов силовых подстанций Красноярской железной дороги, принимается гипотеза об экспоненциальности распределения наработки на отказ, так как благодаря плановой и внеплановой профилактике износные отказы исключены.

Для экспоненциального закона точечной оценки параметров определяется

$$\bar{\lambda} = \frac{(m-1)}{S}, \text{ при } m > 1. \quad (1)$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – представляет собой условную плотность вероятности возникновения отказа для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник, год⁻¹

$$\lambda(t) = \frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{n(t)}{[N_0 - n(t)] \cdot t}. \quad (2)$$

Используя квантили распределения ХИ-квадрат, определяется верхняя и нижняя границы наработки на отказ силовых трансформаторов для разного периода эксплуатации с различной вероятностью $\alpha(0,9; 0,95; 0,99)$

$$\lambda^B = \frac{\chi^2(\alpha, 2 \cdot m + 2)}{(2 \cdot S)}; \quad \lambda^H = \frac{\chi^2(1 - \alpha, 2 \cdot m)}{(2 \cdot S)}, \quad (3)$$

где S – суммарная наработка всех объектов; χ^2 – квантили распределения ХИ-квадрат с соответствующими степенями свободы k ; m – число отказов всех испытуемых объектов.

Ввиду сложности учета всех особенностей работы силовых трансформаторов, а также в условиях предельной нагрузки трансформаторов, в том числе - выработавших нормативный срок службы, при решении задачи анализа надежности для определения параметров их эффективной эксплуатации может успешно применяться одна из многих модификаций искусственной нейронной сети (ИНС) – сеть с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки (рис.2).

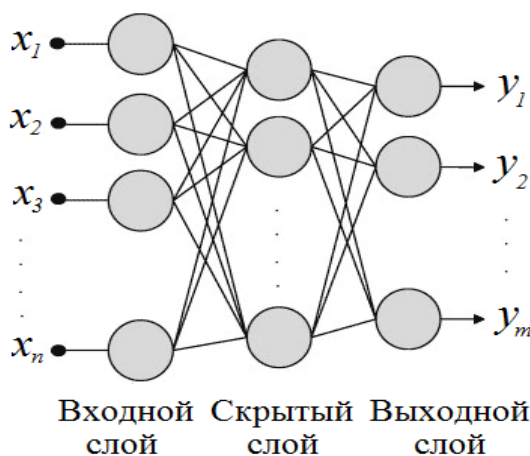


Рисунок 2 – Полносвязная ИНС прямого распространения с одним скрытым и одним выходным слоем

Такая ИНС представляет собой многослойный персептрон, состоящий из входного слоя нейронов, скрытого слоя и выходного слоя. На входы нейронов скрытого и выходного слоёв можно подавать смещение. Любой нейрон такой сети связан со всеми нейронами предыдущих и последующих слоёв. Эти связи характеризуются весовыми коэффициентами. Внутри слоя нейроны не имеют связи друг с другом. Входными величинами для такой модели являются значения $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$, полученные на основе оценивания состояния элементов трансформатора в процессе эксплуатации и испытаний.

Для обучения ИНС используется алгоритм обратного распространения ошибки совместно с одним из алгоритмов поиска экстремума, например – градиентного спуска.

После определения начальных условий считываются значения входных величин $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$, которые нормализуются. Для каждого тренируемого образца вычисления ошибки выполняются по формуле

$$SP = 0,5(GD - NH)^2, \quad (4)$$

где GD – заданное значение выходного параметра; NH – расчетное значение того же параметра.

Для ускорения процесса обучения ИНС приняты пределы изменения: коэффициент скорости обучения $LOP = 0,5-0,7$; момент ускорения обучения $HLDM = 0,8-0,9$.

Длительность процесса вычисления с использованием алгоритма обратного распространения зависит от многих факторов, в том числе и от выбора активационной функции. В данном алгоритме использована одна из наиболее распространенных активационных функций – нелинейная функция активации с насыщением – логическая функция (сигмоид), определяемая по формуле

$$f(S) = \frac{1}{1 + e^{-as}} . \quad (5)$$

Из выражения сигмоида очевидно, что выходные значения нейрона должны находиться в диапазоне от 0 до 1, что требует нормирования исходных данных в этом диапазоне.

Математическая модель на основе ИНС позволяет определять надежность узлов силового трансформатора при использовании функционально несвязанных факторов и решать прямую и обратную задачи надежности.

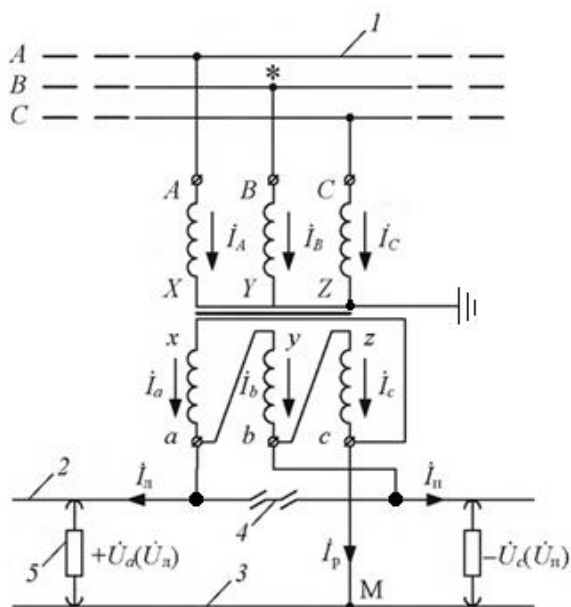
Прямая задача позволяет систематизировать данные о трансформаторе – за определенный период времени, определить наиболее проблемные части конструкции и оценить состояние самого трансформатора, на перспективном участке времени при использовании данных о его загрузке и режимах работы.

Обратная задача определяется входными данными, которыми являются нормативные технические показатели трансформатора – ток, мощность, сопротивление изоляции, температура, сопротивление обмоток и т.д., а выходными параметрами – характеристики системы электроснабжения, обеспечивающие нормативные показатели трансформатора.

Электроприемники железнодорожных потребителей предназначены для работы при номинальных параметрах (частоте, напряжении, токе), изменяющихся по синусоидальному закону, поэтому вопросам качества электроэнергии в системах электроснабжения железной дороги уделяется особое внимание.

Электроподвижной состав (ЭПС) является однофазной нагрузкой большой мощности. При прохождении ЭПС на фидерной зоне происходит коммутация тока вентилей выпрямителя в начале каждого полупериода напряжения. Причем чем мощнее потребитель, тем большая степень этого искажения может быть получена в точке присоединения к сети системы электроснабжения. Физическая сущность искажения синусоидальности переменного напряжения за-

ключается в возникновении режима короткого замыкания цепи переменного тока (обмоток трансформатора) в интервалы коммутации токов вентилей выпрямителя электровоза, в режиме тяги или инвертора в режиме рекуперативного торможения, в результате которого на этих интервалах происходит провал в кривой синусоидального напряжения. Эти провалы искажают форму кривой напряжения и приводят к возникновению высших гармонических составляющих, наибольшими из которых являются нечетные 3-я, 5-я и 7-я гармоники. При этом режим тяги электровоза по сравнению с режимом рекуперативного торможения является наибольшим как по степени нагрузки, так и по времени его применения при движении поезда по участку железной дороги.



Тяговая подстанция переменного тока имеет, как правило, два плеча питания (рис.3).

Рисунок 3 – Схема питания тяговой сети однофазного тока с помощью трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ-11: 1 – трехфазная ЛЭП, 2 – контактная сеть, 3 – рельсы, 4 – нейтральная вставка, 5 – электровоз

На каждое плечо подается напряжение той или иной фазы питающей системы. Каждая тяговая подстанция, подключенная к трехфазной сети, питает только две однофазные нагрузки, поэтому создаваемые электрической тягой нагрузки в трехфазной электрической сети, определяемые токами I_A , I_B , I_C , не являются симметричными. В несимметричной системе электропитания железной дороги возникает ток обратной последовательности, величина которого и его начальная фаза определяются выражениями

$$I_2 = I_{2\Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{3 \cdot U_{НОМ}} \cdot \sqrt{S_{AB}^2 + S_{BC}^2 - S_{AB} \cdot S_{BC}}; \varphi_2 = \varphi_{2\Sigma} = \arctg \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{S_{AB} + S_{BC}}{S_{AB} - S_{BC}} \quad (6)$$

Для устранения несимметрии в системе электроснабжения железной дороги применяются фильтрокомпенсирующие устройства, которые могут эффективно использоваться и в качестве симметрирующих устройств. Мощность батареи конденсаторов (БК) для полного устранения несимметрии определяется выражением

$$Q_{\Sigma} = \sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot I_2 \cdot (\sqrt{3} \cdot \sin \varphi_{2\Sigma} - \cos \varphi_{2\Sigma}) \quad (7)$$

Наличие дополнительной емкости симметрирующего устройства, распределенной по фазам, в сочетании с параметрами сети может эффективно сглаживать напряжения высших гармоник и работать в качестве фильтрокомпенсирующего устройства. Тогда остаточное напряжение n -й гармоники, например, между точками В – С и суммарный ток высшей гармоники, протекающий через фильтр, определяются выражениями

$$U_{n\ BC} = \frac{\rho_{BC} \cdot \sqrt{3} \cdot (1 + \rho_{CA} + \rho_{CA}^2)}{1 + \rho_{BC} + \rho_{CA}} \cdot U_{n^*}, \quad I_{v\Sigma}^{BC} = \sqrt{I_n^2 + (I_n \cdot \sigma_n^{BC})^2}. \quad (8)$$

Для нормальной работы системы «симметрирующее устройство - фильтрокомпенсирующее устройство» мощность батареи конденсаторов должна удовлетворять условию

$$Q_{BC(CA)} \geq 1,2 \cdot U_{НОМ\ БК} \cdot I_{v\Sigma}^{BC(CA)}, \quad (9)$$

что обеспечивает номинальный режим работы системы электроснабжения, увеличивает ее пропускную способность и повышает надежность функционирования ее элементов.

В третьей главе систематизированы исходные данные и выполнен расчет наработки на отказ силового трансформатора тяговой подстанции на различных доверительных интервалах, представлены результаты прогнозирования сопротивления изоляции обмоток силового трансформатора на основе нейронной сети, а также проведен анализ системы «симметрирующее устройство – фильтрокомпенсирующее устройство» и показано ее влияние на повышение качества электроэнергии.

Безотказная работа силовых трансформаторов 35-110 кВ характеризуется средним параметром потока отказов, рассчитанным в доверительных границах, с вероятностью $\alpha(0,9; 0,95; 0,99)$.

Для силовых трансформаторов тяговых подстанций потоки отказов основных элементов трансформатора – обмотки, вводов, переключающего устройства и магнитопровода, полученные при использовании квантилей распределения ХИ-квадрат на различном временном периоде эксплуатации трансформаторов представлены на рис.4.

На основе полученных результатов потока отказов силовых трансформаторов можно сделать вывод, что наиболее частые повреждения основных элементов трансформаторов приходятся на период от 16 до 39 лет, а одним из самых повреждаемых элементов силового трансформатора является обмотка с потоком отказов, превышающим значение $\bar{\lambda} = 0,02$.

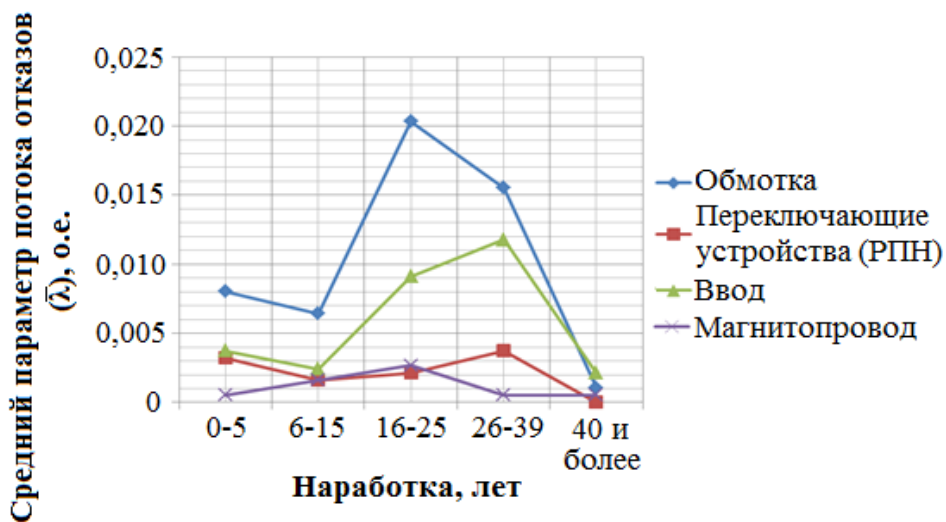


Рисунок 4 – Расчет потока отказов элементов силовых трансформаторов

принятия решения об эксплуатации трансформатора.

Данная характеристика отражает комплексное состояние изоляции обмотки трансформатора - учитывает текущие физические воздействия, а также условия и продолжительность эксплуатации трансформатора в предыдущие периоды.

На Красноярской железной дороге в эксплуатации находятся силовые трансформаторы типа ТДТНЖ-40000/110 с различным сроком службы. В качестве входных данных для прогнозирования параметров R_{60}/R_{15} трансформатора принимаются значения, отраженные в протоколах испытаний с глубиной предыстории, не превышающей 5 лет. Результаты прогнозирования параметров R_{60}/R_{15} трансформатора с упреждением 1 год представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты прогноза ИНС сопротивления изоляции R_{60}/R_{15} с использованием алгоритма обратного распространения ошибки на 1 год

Сопротивление изоляции, МОм			
Схема испытания	R_{60}/R_{15} , (факт)	R_{60}/R_{15} , (прогноз)	Погрешность, %
1) ВН-СН+НН+Корпус	1,32	1,34	1,5
2) СН-ВН+НН+Корпус	1,39	1,35	2,9
3) НН-ВН+СН+Корпус	1,37	1,32	3,6
4) ВН+СН-НН+Корпус	1,30	1,36	4,4
5) ВН+СН+НН-Корпус	1,34	1,32	1,5

Максимальная погрешность расчетов не превышает 4,4%, что является приемлемой величиной для прогноза с годовым упреждением. Следует учесть, что дальнейшая эксплуатация трансформатора допустима в режиме, который является адекватным его эксплуатации в предыдущие годы.

Одним из обязательных параметров при проверке состояния силового трансформатора является отношение сопротивления изоляции R_{60}/R_{15} , величина которого фиксируется в протоколе испытаний и является определяющей для

При изменении тяговой нагрузки трансформатора в связи с увеличением пропускной способности Красноярской железной дороги и уменьшением межпоездного интервала, а также при прохождении тяжеловесных составов значительно изменяются условия эксплуатации трансформаторов, что приводит к повышению температуры его обмоток. На рис. 5 представлены данные изменения R_{60}/R_{15} трансформатора для нормального режима (40°C – 50°C), а также при увеличенном тепловыделении обмоток трансформатора (70°C – 90°C), что характеризует повышенные электрические нагрузки при прохождении тяжеловесных составов.

Из представленных результатов (рис.5) видно, что увеличение температуры масла трансформатора, приводящее к перегреву обмоток трансформатора, снижает отношение сопротивления изоляции R_{60}/R_{15} . На основании этого можно судить об ухудшении состояния изоляции обмоток при повышенных электрических нагрузках трансформатора, что может привести к выходу трансформатора из строя.

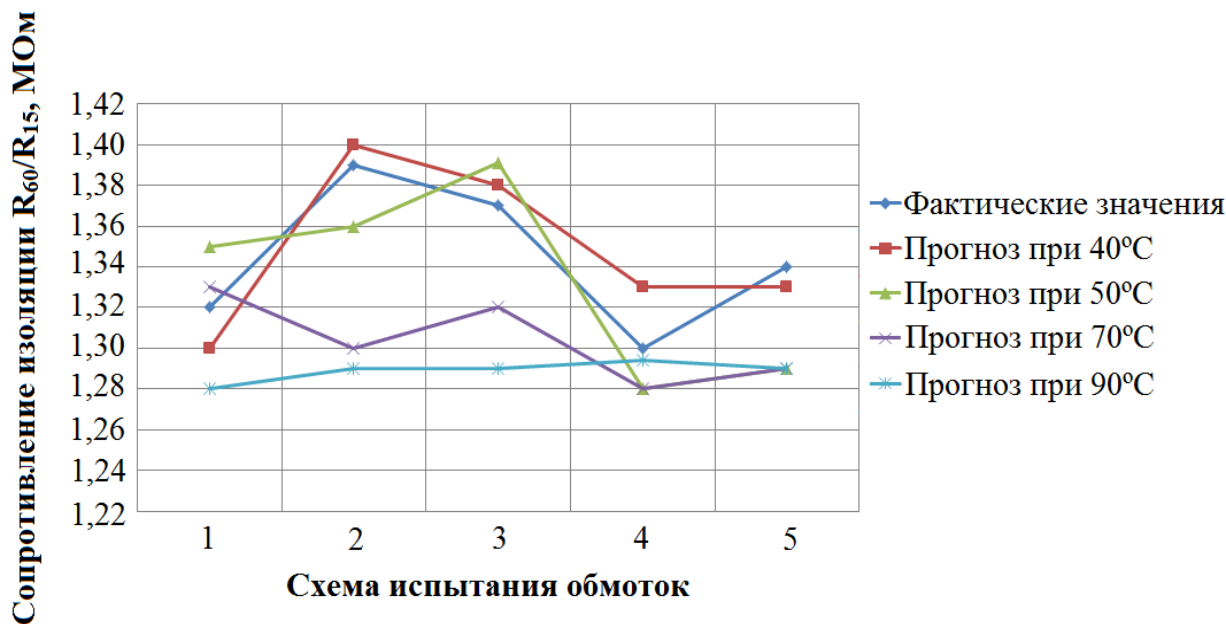


Рисунок 5 – Прогноз отношения сопротивления изоляции обмоток силового трансформатора с учетом температуры обмоток

На перегрев обмоток и магнитопровода трансформатора существенное влияние оказывает повышенная реактивная мощность и наличие высших гармоник в системе электроснабжения железной дороги, что вызвано индуктивным характером и несимметрией тяговой нагрузки железной дороги.

Уменьшить несимметрию нагрузки, снизить реактивную составляющую мощности и величину высших гармоник в системе электроснабжения можно, применив методику расчета системы «симметрирующее устройство – фильтрокомпенсирующее устройство» и настроив систему на требуемые параметры.

Реализуя предложенную методику для подстанции с трансформатором ТДТНЖ 40 МВА, к которому подключены однофазные нагрузки мощностью 17 МВА к зажимам АВ и мощностью 10 МВА к зажимам ВС, а величина тока несимметрии второй гармоники тока составляет $I_2 = I_{2\Sigma} = 296 \text{ кА}$, для устранения несимметрии потребуется распределенная по фазам батарея конденсаторов $Q_{BC} = 15,34 \text{ МВАр}$ и $Q_{CA} = 14,14 \text{ МВАр}$.

Симметрирующее устройство на базе батареи конденсаторов, распределенных по фазам ВС и СА, которое используется для симметрирования сети, можно эффективно использовать для фильтрации 3-й, 5-й и 7-й гармоник, которые сильно проявляются в тяговой сети: $U_{5*} = 5,8\%$, $U_{7*} = 4,9\%$.

Симметрирующее устройство, реализованное по предложенной методике, позволяет снизить напряжение, например, 7-й гармоники до величины $U_{7 \text{ АВ}} = 0,35\%$; $U_{7 \text{ ВС}} = 0,20\%$; $U_{7 \text{ СА}} = 0,21\%$ соответственно, что значительно меньше первоначального значения 4,9%.

Предложенная методика расчета системы «симметрирующее устройство – фильтрокомпенсирующее устройство» позволяет, варьируя параметрами фазных емкостей, получить требуемое снижение высших гармоник, не ухудшая симметрирование напряжений (токов) и компенсацию реактивной мощности.

В четвертой главе рассмотрены результаты экспериментальных исследований надежности оборудования системы тягового электроснабжения Красноярской железной дороги, исследовано влияние тяговой нагрузки на электрические и тепловые параметры различных режимов работы электрооборудования тяговых подстанций.

На надежность и эффективность работы силового трансформатора влияет много факторов: величина электрической нагрузки, температура окружающей среды, ухудшение сопротивления изоляции, старение масла и т.д. Основным фактором является величина электрической нагрузки, которая определяется массой и периодичностью проходящих составов.

Измерения величины электрической нагрузки и температуры трансформатора проводились при прохождении составов различной массы, которые показали, что при массе состава 3000 – 5000 тонн и межпоездном интервале 16 минут загрузка трансформатора будет оптимальной, а максимальная температура в верхней части трансформатора не превысит 36 - 40 °С.

При прохождении состава массой 7000 тонн, ток на шинах тяговой подстанции на стороне напряжения трансформатора 27,5 кВ составляет 900 А, на стороне 110 кВ составляет 250 А. Эта величина тока в 2,5 раза превышает зна-

чения при прохождении состава массой 3000 тонн. Температура верхних слоев масла трансформатора достигает $48,8^{\circ}\text{C}$ (рис.6), что на 25% выше температуры трансформатора при тяговой нагрузке состава массой 3000 тонн.

При увеличении массы состава величина тока в обмотках трансформатора повышается и может достигать критических значений, (рис.7), что требует исследования параметров тяговой сети.



Рисунок 6 - Изменение температуры трансформатора при повышенной массе состава

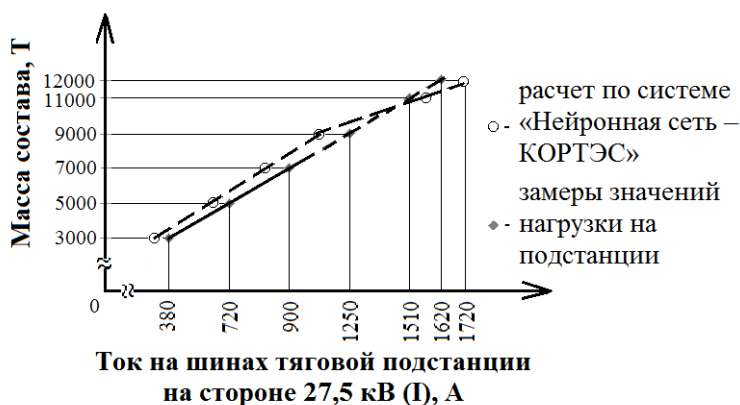


Рисунок 7 - Изменение тока на стороне СН СТ 27,5 кВ при прохождении состава повышенной массы

Изменение параметров тяговой сети для составов различной массы, начиная с 3000 до 12000 тонн, исследовано при помощи программного комплекса «КОРТЭС». При увеличении массы состава до 9000 – 12000 тонн вырастает ток в трансформаторе и проводах системы электроснабжения, снижается напряжение, повышается температура обмоток трансформатора. В табл. 2 представлены расчетные и фактические значения напряжения тяговой обмотки СН трансформатора при нормативном прохождении подвижного состава с различной массой.

Прогнозные значения напряжения обмотки СН трансформатора, полученные на основе ИНС, являются нормативно обоснованными и позволяют работать силовому оборудованию в штатном режиме, что исключает аварийные ситуации. Выходные значения прогноза напряжения на обмотке СН не превышают 5%, что говорит о правильной работоспособности комплексной системы расчета «Нейронная сеть – КОРТЭС» и позволяет рекомендовать параметры напряжения, обеспечивающие бесперебойность работы силового оборудования системы электроснабжения для различных режимов.

Для продолжения исследований режимов нагрузки системы 27,5 кВ составлен график движения поездов на исследуемом участке (рис. 8), с определенным межпоездным интервалом, при этом учитывается также тип поезда (пассажирский, грузовой, грузовой повышенной массы).

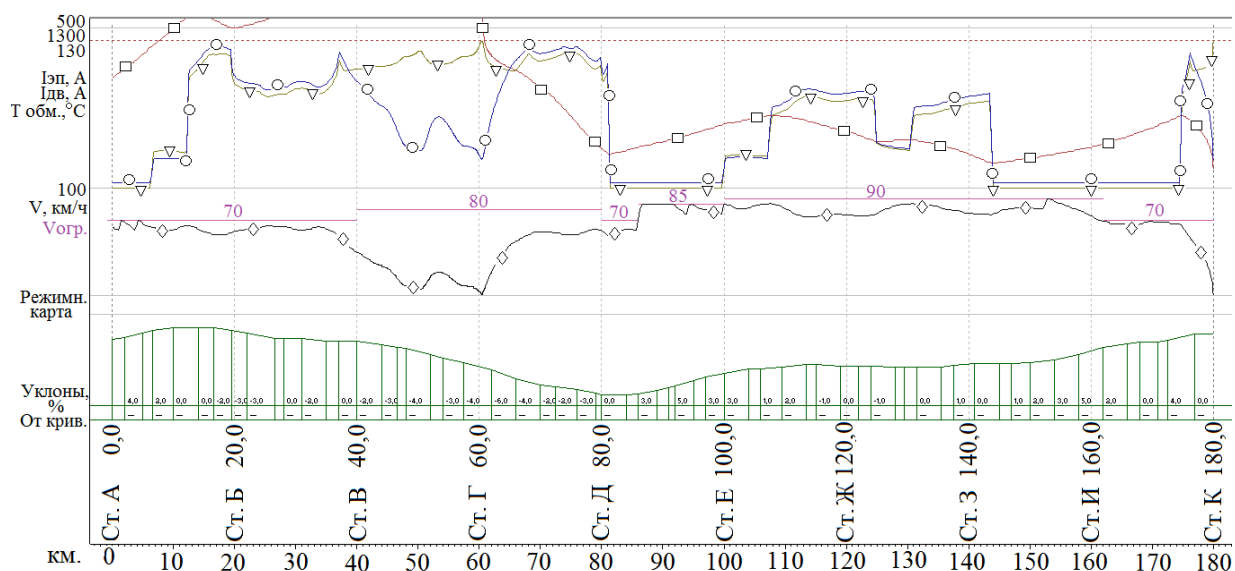


Рисунок 8 – График тягового расчета для грузового поезда повышенной массы 7000 тонн (нечетное направление): □ – температура обмотки ЭПС, °С; ○ – полный ток ЭПС, А; ▽ – ток двигателя ЭПС, А; ◇ – значение скорости ЭПС, км/ч

Таблица 2 – Результаты расчета ИНС на обмотке СН силового трансформатора тяговой подстанции

Масса состава, Т	Напряжение (факт), кВ	Напряжение (прогноз), кВ	Погрешность, %
3000	26,97	27,30	1,20
7000	24,11	25,34	4,85
9000	21,34	22,20	3,87
12000	20,67	21,23	2,64

Для анализа энерготепловых режимов трансформатора выполнены исследования параметров нагрева обмоток трансформатора при массе состава, достигающей 12000 тонн. Превышения температуры трансформатора ТДТНЖ-40000/110-71У1 при предельных нагрузках представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Превышения температуры трансформатора при предельных нагрузках

Масса состава, тонн	Ток в обмотке, А	Мощность потерь, Вт	Температура трансформатора, °С		
			$\theta_{o.v.1}$	$\theta_{o.v.2}$	$\theta_{o.v.3}$
3000	380	220000	64	62	61
7000	900	286000	69	68	67
9000	1250	330000	74	72	71
12000	1620	396000	80	78	77

Примечание: $\theta_{o.v.1}$ – превышение температуры обмоток над воздухом для НН, °С; $\theta_{o.v.2}$ – превышение температуры обмоток над воздухом для ВН, °С; $\theta_{o.v.3}$ – превышение температуры обмоток над воздухом для СН, °С

Согласно полученным данным (табл. 3), можно сделать вывод, что при увеличении массы состава более 5000-7000 тонн возможно превышение допу-

стимой температуры обмоток трансформатора, что требует тщательной оценки состояния силового электрооборудования и выбора его режима работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнены исследования силовых масляных трансформаторов с предельным сроком эксплуатации. Установлено, что надежность работы силовых трансформаторов напрямую зависит от раннего обнаружения развивающихся дефектов. Для определения остаточного ресурса и рекомендаций по режимам работы силовых трансформаторов целесообразно использовать анализ статистических данных состояния трансформатора за период эксплуатации 5 лет.

2. Разработана методика комплексного анализа режимов работы системы тягового электроснабжения с учетом эффективности работы силовых трансформаторов в критических режимах, что позволяет повысить их надежность и увеличить период безаварийной эксплуатации.

3. Создана модель прогнозирования надежности силовых трансформаторов на основе искусственного интеллекта, исследование которой может служить основой для разработки рекомендаций по условиям эксплуатации и режимам работы силовых трансформаторов.

4. Разработана математическая модель и создана методика расчета параметров «симметрирующее устройство – фильтрокомпенсирующее устройство», проведена ее промышленная адаптация, позволяющая комплексно снизить загрузку системы электроснабжения реактивной мощностью и уменьшить несимметрию токов до 1%, а также снизить остаточное напряжение основных высших гармоник до 0,5%.

5. Выполнены расчеты электрических и тепловых параметров силового трансформатора при прохождении составов повышенной массы и сформулированы рекомендации по повышению эффективности работы оборудования системы тягового электроснабжения Красноярской железной дороги, что подтверждено актом внедрения результатов диссертационной работы от 09.02.2016 г.

6. Решена обратная задача прогнозирования оптимальных параметров системы электроснабжения при требуемых показателях надежности силового трансформатора, позволяющая комплексно гарантировать состояние оборудования с упреждением один год при допустимых параметрах электрической сети.

7. Выполнен сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и теоретических расчетов надежности оборудования тяговых подстанций, и показано, что погрешность не превышает 8%.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Христинич, Р.М. Прогнозирование надежности и режимов работы тяговых трансформаторов в условиях предельной нагрузки / Р.М. Христинич, **А.С. Луковенко** // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – №2. – С. 130-136. – ISSN 1813 – 9108.

2. Христинич, Р.М. Расчет несимметричных режимов тяговой сети переменного тока / Р.М. Христинич, **А.С. Луковенко** // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – №2. – С. 192-195. – ISSN 2071 – 3827.

3. **Луковенко, А.С.** Анализ режимов работы системы тягового электроснабжения Красноярской железной дороги при прохождении тяжеловесных составов / А.С. Луковенко, Р.М. Христинич // Энергосбережение и водоподготовка. – 2016. – №2 (100). – С. 57-61 – ISSN 1992 – 4658.

4. **Луковенко, А.С.** Повышение надежности оборудования электрических подстанций тягового электроснабжения при работе в критических режимах / А.С. Луковенко, Р.М. Христинич // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2016. – №2. – С. 36-40. – ISSN 1995 – 5685.

В зарубежных изданиях

5. **Луковенко, А.С.** Влияние температурных режимов на работоспособность силового трансформатора / А.С. Луковенко, Р.М. Христинич // East European Scientific Journal, Warsaw, Poland. – 2015. – Vol. 2. – P. 112-116.

Статьи и материалы конференций

6. Христинич, Р.М. Анализ надежности трансформаторных подстанций 110 кВ с большим сроком эксплуатации / Р.М. Христинич, **А.С. Луковенко** // 120 лет железнодорожному образованию в Сибири: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: В 1 т. / Отв. ред. Мороз Ж.М. Красноярск: Изд-во «Касс», – 2014. – С. 176-179.

7. **Луковенко, А.С.** Установившиеся несимметричные режимы в тяговой сети / А.С. Луковенко // Технические науки - от теории к практике: сборник публикаций по материалам I, II международной научно-практической конференции. Санкт-Петербурга, – 2015. – С. 26-30.

8. **Луковенко, А.С.** Повышение надежности силового трансформатора с применением нейросетевого комплекса / А.С. Луковенко // Проблемы и достижения в науке и технике: сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. № 2. Омск, – 2015. – С. 73-76.

9. **Луковенко, А.С.** Основные направления теории надежности силового трансформатора / А.С. Луковенко // Перспективы развития технических наук: сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. № 2. Челябинск, – 2015. – С. 53-55.

10. **Луковенко, А.С.** Несимметричные режимы тяговой сети / А.С. Луковенко // Актуальные проблемы науки XXI века: сборник статей по материалам I международной научно-практической конференции, Москва, – 2015. – С. 124 – 126.

11. **Луковенко, А.С.** Повышение надежности работы оборудования с использованием модели нейросетевого комплекса / А.С. Луковенко // Наука третьего тысячелетия: сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. ТОМ 1. Нефтекамск, – 2015. – С. 35 – 39.

12. **Луковенко, А.С.** Проектирование нагрузочных характеристик системы тягового электроснабжения при прохождении тяжеловесных составов / А.С. Луковенко // Проблемы теории и практики в современной науке: материалы Международной (заочной) молодежной научно-практической конференции под общей редакцией А.И. Вострецова. Минск, – 2016. – С. 8 – 13.

13. **Луковенко, А.С.** Определение остаточного ресурса работы силовых трансформаторов с использованием модели искусственного интеллекта / А.С. Луковенко, Р.М. Христинич // Современное состояние и перспективы развития транспортной системы России: сборник трудов научно – практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Иркутск, – 2016. – С. 56 – 61.

Подписано в печать 30.06.2016 г.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ № 1

Отпечатано в типографии КриЖТ ИрГУПС
660028, г. Красноярск, ул. Л. Кецовели, 89