

На правах рукописи



ТРОФИМОВИЧ Полина Николаевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НАПРЯЖЕНИЕМ 25 кВ
НА ОСНОВЕ ВСТРЕЧНОГО ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Хабаровск – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» на кафедре «Системы электроснабжения».

Научный руководитель:

Григорьев Николай Потапович,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Герман Леонид Абрамович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техника и технология железнодорожного транспорта» Нижегородского филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарского государственного университета путей сообщения»;

Гринкруг Мирон Соломонович, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Общая физика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск

Защита состоится «__»_____2020 г. в __ час. 00 мин. на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.086.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет» по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, корпус 3, аудитория 201/3. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «КНАГУ» и на официальном сайте https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/129. Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ФГБОУ ВО «КНАГУ», учёному секретарю диссертационного совета Д 999.086.03, e-mail: eraru@knastu.ru.

Автореферат разослан «__»_____2020 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
Д 999.086.03, к.т.н., доцент

А. С. Гудим

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Принятые стратегические программы развития железнодорожного транспорта предусматривают повышение весовых норм поездов, качественное улучшение структуры управления расхода электроэнергии на организацию движения поездов посредством систем учёта, нормирования и мониторинга потребления топливно-энергетических ресурсов.

Решение задачи управления показателями работы системы тягового электроснабжения (СТЭ) при взаимодействии с другой сложной системой внешнего электроснабжения (СВЭ) может быть осуществлено на основе встречного интервального регулирования показателей работы, направленных на повышение эффективности деятельности СТЭ.

Из отмеченного выше следует, что тема диссертационного исследования «Повышение эффективности системы тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ на основе встречного интервального регулирования» является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Исследование выполнено на основе результатов работ отечественных и зарубежных ученых, которые занимались вопросами анализа и повышения эффективности работы системы тягового электроснабжения (Б.А. Аржанников, М.П. Бадер, В.Д. Бардушко, Ю. М. Бей, Б.М. Бородулин, А.Т. Бурков, А.М. Василянский, С.П. Власов, Л.А. Герман, Б.Е. Дынькин, А.В. Ефимов, Ю.И. Жарков, А.Н. Заварнакин, В.Н. Зажирко, В.П. Закарюкин, А.Б. Косарев, А.В. Котельников, В.И. Кочкин, А.В. Крюков, Р.Р. Мамошин, Г.Г. Марквардт, К.Г. Марквардт, В.Е. Марский, Г.П. Маслов, Н.И. Молин, А.С. Серебряков, Э.В. Тер-Оганов, В.Т. Черемисин, А.S. Al-Abdulwahab, К.М. Winter, S. Kahrobaee, S. Asgarpoor и многие др).

Объектом исследования является СТЭ железных дорог переменного тока напряжением 25 кВ с учетом совместной работы с СВЭ.

Предметом исследования является снижение потерь электрической энергии в СТЭ переменного тока при условии выполнения графика движения поездов.

Цель исследования – совершенствование работы СТЭ переменного тока напряжением 25 кВ посредством определения схем питания тяговых нагрузок, обеспечивающих минимальные потери электрической энергии при условии выполнения графика движения поездов.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие основные задачи.

1. Проанализировать эффективность управления потреблением электрической энергии в СТЭ в целях выполнения перспективных требований, которые определены стратегическими программами развития.

2. Разработать алгоритмы встречного интервального регулирования напряжения в тяговой сети, гарантирующие снижение потерь электрической энергии при условии выполнения графика движения поездов.

3. Выполнить оценку технико-экономической эффективности разработанных мероприятий, направленных на повышение показателей работы СТЭ переменного тока.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана методика определения прогнозных интервалов времени для встречного интервального управления интегральных показателей работы СТЭ в целях повышения напряжения в тяговой сети и одновременного снижения потерь электрической энергии.

2. Уточнена модель расчета потерь электрической энергии в тяговых трансформаторах, которая обеспечивает повышение точности оценки эффективности их работы.

3. Разработан новый способ защиты тягового трансформатора от внутренних повреждений, позволяющий повысить работоспособность СТЭ.

Теоретическая и практическая ценность результатов диссертационной работы заключается в следующем.

1. Разработана методика определения прогнозных интервалов времени с целью выбора схем питания тяговых нагрузок в соответствии с требованиями не только выполнения графика движения поездов при минимальных потерях электрической энергии, но и рациональным применением нормативного ресурса коммутационных аппаратов.

2. Разработана методика определения рациональных значений сопротивлений и мест включения устройств продольной компенсации, которая позволяет стабилизировать напряжение на шинах тяговых подстанций с целью выполнения графика движения поездов.

3. Предложена методика расчета потерь электрической энергии в тяговых трансформаторах, которая обеспечивает учёт действительных значений несимметрии напряжений и токов, температуры обмоток и коэффициента трансформации.

4. Уточнён алгоритм выбора схем питания тяговых нагрузок, который обеспечивает выполнение графика движения поездов, снижение нагрузки в тяговой сети и трансформаторах и дополнительных потерь электрической энергии.

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии в формулировке гипотезы о повышении эффективности работы тягового электроснабжения, что достигается встречным интервальным управлением технико-экономическими показателями благодаря определению ступеней устройств регулирования напряжения и положений коммутационных аппаратов, таким образом, чтобы обеспечить соответствие схем питания тяговых нагрузок критерию норма в интервалах времени и в получении практических результатов для её доказательства.

Методы исследования

При решении поставленных задач использованы основные положения теории: электротехники и электроснабжения системы электрифицированных железных дорог переменного тока, математической статистики и методов анализа сложных систем, программирования и теории математического моделирования.

Для выполнения расчётов и анализа полученных результатов использовались программные продукты: электронные таблицы Microsoft Excel, КОРТЭС и пакет прикладных программ MATLAB.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанная методика определения прогнозных интервалов времени и показателей работы СТЭ для выбора нормальных схем питания тяговых нагрузок.

2. Разработанный алгоритм выбора ступеней устройств регулирования напряжения и числа тяговых трансформаторов в работе в целях обеспечения выполнения графика движения поездов по условию нормативного напряжения в тяговой сети и снижения потерь электрической энергии.

3. Уточнён алгоритм выбора схем питания тяговых нагрузок, который позволяет снизить нагрузки в тяговой сети и трансформаторах и уменьшить потери электрической энергии.

4. Новый способ защиты тяговых трансформаторов от внутренних повреждений, позволяющий повысить работоспособность СТЭ.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и полученных результатов базируется на строго доказанной и корректно использованной теории математического анализа, математического и имитационного моделирования. Теоретические исследования выполнены на основе теории линейных электрических цепей, методов математической статистики и теории вероятности. Достоверность подтверждена также экспериментальными исследованиями. Экспериментальные исследования проводились на действующих тяговых и подпитывающих подстанциях с помощью современной измерительной аппаратуры и средств автоматизации обработки результатов эксперимента.

Основные положения исследования доложены и обсуждены на следующих конференциях: на Девятой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (г. Иркутск, 10 – 13 апреля 2018 г.); Всероссийской научно-практической конференции творческой молодёжи с международным участием «Научно-техническое и социально-экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке» (г. Хабаровск, 17–19 апреля 2018 г., ДВГУПС); Всероссийской научно-практической конференции «Электропривод на транспорте и в промышленности» (г. Хабаровск, 20-21 сентября 2018 г., ДВГУПС); Юбилейной десятой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (г. Иркутск, 21 – 24 мая 2019 г.); в том числе на научно-технических семинарах кафедр «Электротехника, электроника и электромеханика» и «Системы электроснабжения» Электроэнергетического института ДВГУПС (г. Хабаровск, ДВГУПС, 2018–2019 гг.).

Результаты исследования внедрены на Уссурийской дистанции электроснабжения ДВОСТЖД в целях повышения эффективности работы, а также в учебный процесс кафедры «Системы электроснабжения» ДВГУПС для выполнения выпускных квалификационных работ при подготовке специалистов, обучающихся по

направлению 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов» (специализация «Электроснабжение железных дорог»).

Публикации. Основные выводы и предложения по рассмотренным в исследовании вопросам нашли отражение в 11 печатных работах, в том числе в пяти статьях, четыре из которых опубликованы в журналах перечня ВАК Российской Федерации, одна – в журнале, входящем в международную систему цитирования Scopus, и трёх патентах на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 73 источника и двух приложений; содержит 110 страниц текста, включая 30 рисунков, 17 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность, приведены цель и задачи, научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, выдвинута гипотеза и сформулированы задачи для её доказательства и положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** рассмотрены и приведены результаты анализа не только показателей работы СТЭ, но и современных технологий при применении устройств регулирования напряжения в целях выполнения графика движения поездов при условии минимальных потерь электроэнергии и рационального использования ресурса коммутационных аппаратов.

Кроме этого, определена взаимосвязь перспективных требований и механизмов повышения эффективности работы системы тягового электроснабжения, которая представлена на рис. 1. Стратегические программы развития железных дорог определяют перспективные условия работы СТЭ. Выполнение требований, определяемых повышением эффективности перевозочного процесса, предложено обеспечить применением комплекса мероприятий в СТЭ.

Механизмы повышения эффективности работы СТЭ предусматривают реализацию следующих мероприятий: переход от реактивного к встречному интервальному управлению показателями работы тягового электроснабжения, применение новых схем питания тяговых нагрузок и т.д.

Общеизвестно, что напряжение в тяговой сети зависит от нагрузок электроподвижного состава, входного напряжения СВЭ, сопротивлений устройств компенсации, ступеней регулирования напряжения (РПН) силовых трансформаторов тяговых подстанций (далее тяговые трансформаторы) и положений коммутационных аппаратов.

В работах [А.П. Парфиановича и др.] введено и обосновано понятие нормальных схем питания тяговых нагрузок. Кроме этого, соответствие схем питания тяговых нагрузок критерию норма предлагается определять по трём формам нормальных схем.

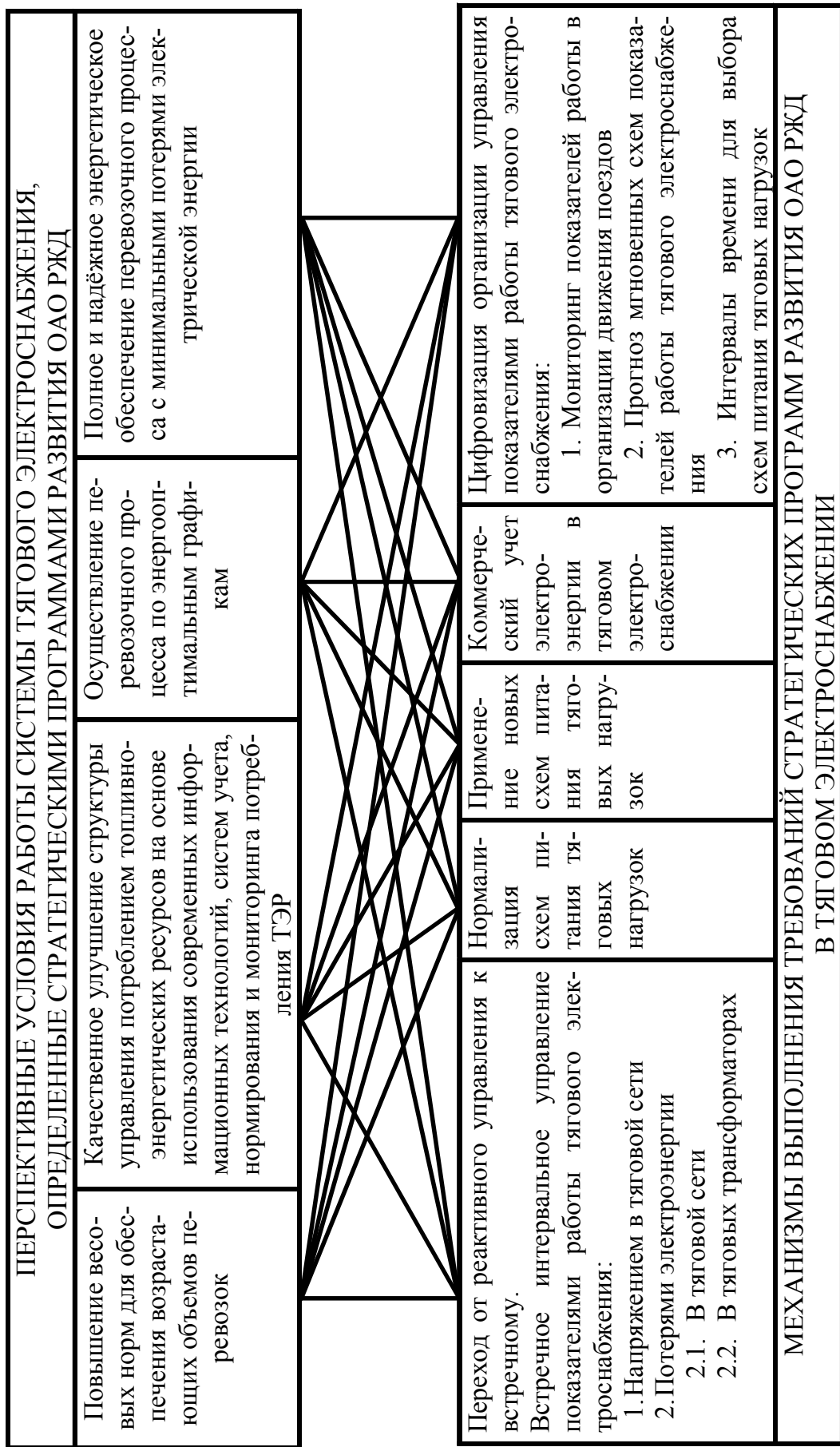


Рис. 1 Схема взаимосвязи перспективных требований и механизмов повышения эффективности работы системы тягового электроснабжения

Первая форма обеспечивает напряжение в тяговой сети, необходимое для выполнения графика движения поездов, и может быть определена следующим критерием:

$$[U_{\max}] \geq U_{ij} \geq [U_{\min}], \quad (1)$$

где $[U_{\max}]$, $[U_{\min}]$ – максимальное и минимальное предельно допустимые значения напряжения на токоприёмнике электроподвижного состава; U_{ij} – напряжение в тяговой сети в i -том интервале времени, $i=1, \dots, m$; и j -том узле тяговой сети, $j=1, \dots, m_i$.

Соответствие схемы питания по второй форме определяется минимальным потреблением электрической энергии, но при соответствии первой форме. Критерий соответствия второй форме определен следующим выражением:

$$\Delta W_{\text{тс}} = \sum_{i=1}^m (\Delta W_{\text{ти}} + \Delta W_{\text{ки}} + \Delta W_{\text{ди}}) \Rightarrow \min, \quad (2)$$

где $\Delta W_{\text{ти}}$; $\Delta W_{\text{ки}}$; $\Delta W_{\text{ди}}$ – технологические, коммерческие и дополнительные потери электрической энергии в i -том интервале времени; m – число интервалов.

Соответствие схем питания тяговых нагрузок критерию норма по второй форме обеспечивает снижение потерь электрической энергии. Разность векторов напряжений на тяговых шинах смежных подстанций при узловом режиме питания тяговой сети приводит к уравнительному току \dot{I}_y в контуре тяговой сети. Протекание уравнительного тока вызывает не только дополнительные потери электроэнергии, но и может приводить к превышению номинальных токов аппаратов и оборудования СТЭ. Дополнительные потери электрической энергии $\Delta W_{\text{д}}$ в тяговой сети определяются по формуле

$$\Delta W_{\text{д}} = \sum_{i=1}^m I_{yi}^2 R_{\text{т}} T_i, \quad (3)$$

где $R_{\text{т}}$ – активное сопротивление контура тяговой сети, Ом;

m – число интервалов;

T_i – интервал времени, при котором уравнительный ток можно принять неизменным.

Из этого следует, что для отдельных участков снижение дополнительных потерь электрической энергии, которые являются следствием протекания уравнительных токов, возможно при переходе от узлового режима питания тяговой сети к петлевой. Практически доказано, что переход к петлевой схеме питания тяговых нагрузок позволяет повышать эффективность работы СТЭ.

Третья форма определяется рациональным применением ресурса коммутационных аппаратов и устройств регулирования напряжения при соответствии по первой и второй форме. Соответствие третьей форме нормальных схем выполняется числом переключений коммутационных аппаратов, которое определяется среднесуточным ресурсом ($\bar{Q}_{\text{сут}}$) по формуле:

$$\bar{Q}_{\text{сут}} \cong \frac{Q_{\text{норм}}}{365 T_{\text{норм}}}, \quad (4)$$

где $Q_{\text{норм}}$, $T_{\text{норм}}$ – нормируемые ресурс (число циклов) и срок службы коммутационного аппарата соответственно.

В главе 2 изложены результаты проведенного анализа влияния устройств и методов регулирования напряжения, представлена разработанная методика выбора интервалов времени нормальных схем питания тяговых нагрузок и предложены алгоритмы выбора ступеней устройств регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций.

Регулирование напряжения на шинах тяговой подстанции выполняется изменением ступеней устройств КУ, УПК, РПН и положения коммутационных аппаратов на предстоящий интервал времени:

$$U_{\text{л}}(i), U_{\text{п}}(i) = f(X_{\text{КУЛкi}}, X_{\text{КУПкi}}, X_{\text{УПКкi}}, n_{\text{ji}}),$$

где $X_{\text{КУЛкi}}$, $X_{\text{КУПкi}}$ – сопротивления к-той ступени устройств КУ, левого и (или) правого плеча i-того интервала;

$X_{\text{УПКкi}}$ – сопротивление УПК к-й ступени i-того интервала;

n_{ji} – коэффициент трансформации тягового трансформатора j-той ступени РПН i-того интервала.

Рассмотрим последовательность значений мгновенных схем в общем виде. Длительность мгновенной схемы зависит от шага квантования измерений по времени, принятого в системе мониторинга.

Интервал времени формируется из последовательности мгновенных схем по их значениям, полученным в результате моделирования. Время интервала с порядковым номером i (t_i) определяем по порядковым номерам мгновенных схем и времени мгновенной схемы (Δt) по формуле

$$t_i = (j_{\text{ки}} - j_{\text{ни}} + 1)\Delta t, \quad (5)$$

где $j_{\text{ки}}$ – номер мгновенной схемы, соответствующий концу интервала i;

$j_{\text{ни}}$ – номер мгновенной схемы, соответствующий началу интервала i.

При этом порядковые номера мгновенных схем нельзя менять местами. Объединять мгновенные схемы в один интервал следует по условию

$$|a_{\text{ни}} - a_{\text{k}}| \leq \Delta a, \quad (6)$$

где a_{k} – значение рассматриваемой мгновенной схемы;

Δa – предельно допустимое отклонение значения рассматриваемой мгновенной схемы (a_{k}) относительно значения мгновенной схемы ($a_{\text{ни}}$), которая является началом интервала i.

Мгновенные схемы от 1 до 15 (рис. 2) включены в первый интервал по принятому условию [см. формулу (6)].

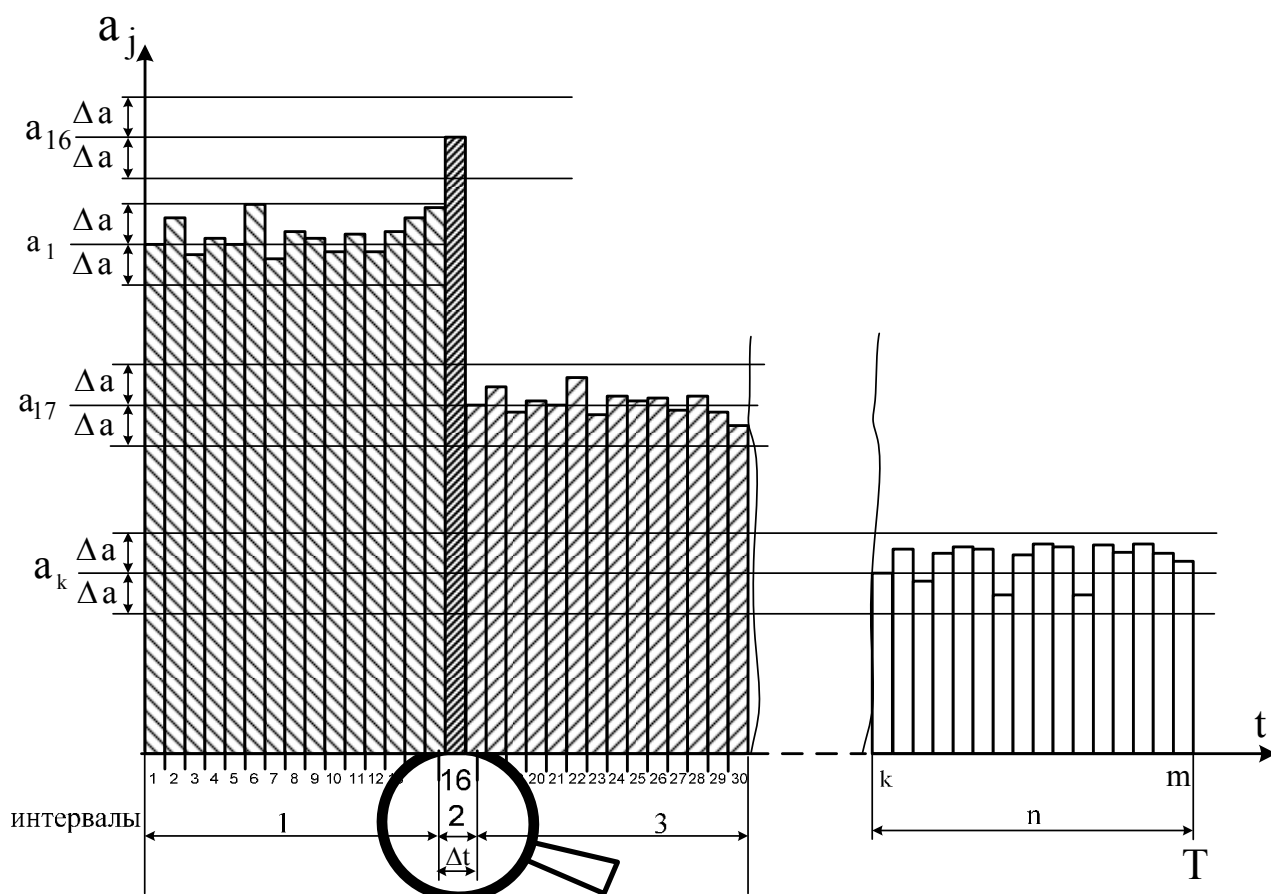


Рис. 2. График мгновенных схем показателя работы СТЭ

Значение мгновенной схемы 16 (рис. 2) не соответствует условию включения в интервал 1 [см. формулу (6)], поэтому мгновенная схема 15 завершает первый интервал. Мгновенная схема 16 является началом очередного (второго) интервала. В целом принятое условие формирования интервалов предусматривает образование интервала, состоящего из одной мгновенной схемы.

Значение мгновенной схемы 17 по условию формулы (6) не позволяет включить ее во второй интервал. Начало третьего интервала определяет мгновенная схема 17, не включенная в интервал 2. Мгновенная схема 16 определяет конец второго интервала. В общем виде начало следующего интервала определяем по формуле

$$j_{ni} = j_{ki-1} + 1. \quad (7)$$

Задача снижения количества интервалов в расчетном периоде решается объединением интервалов, расположенных рядом, или присоединением части мгновенных схем одного интервала к двум, расположенным слева и справа. При этом в первую очередь присоединяются наиболее короткие по продолжительности интервалы. Условием объединения интервалов является минимальная дисперсия образуемых интервалов.

Эффективность снижения дисперсии расчетного показателя при переходе от точного периода к интервалам времени определяем коэффициентом эффективности формирования интервалов $K_{эфн}$ по формуле

$$K_{\text{эф}} = D_T T / \sum_{i=1}^n D_i t_i, \quad (8)$$

где n – число интервалов в периоде T .

Применение прогнозных интервалов схем питания тяговых нагрузок при управлении показателями работы СТЭ позволяет осуществить переход от реактивного управления к встречному интервальному.

В СТЭ для регулирования напряжения широко применяются УПК. Влияние УПК на напряжение плеч питания рассмотрим с целью оценки соответствия схем питания тяговых нагрузок в интервалах времени по критерию норма в соответствии с первой формой нормальных схем. Расчетная схема для определения влияния устройства УПК, включённого в фидер обратного тока, на напряжение приведена на рис. 3.

Падение напряжения на индуктивных сопротивлениях обмоток высшего X_B , тягового напряжения X_T трансформатора и входном сопротивлении СВЭ $X_{\text{вх}}$ при протекании по ним токов плеч определяем по следующим формулам:

$$\Delta \dot{U}_{\text{лх}\Sigma} = jX_{\Sigma} \left(\frac{2}{3} I_{\text{л}} e^{-j(120+\varphi_{\text{л}})} - \frac{1}{3} I_{\text{п}} e^{-j\varphi_{\text{п}}} \right), \quad (9)$$

$$\Delta \dot{U}_{\text{пх}\Sigma} = jX_{\Sigma} \left(\frac{2}{3} I_{\text{п}} e^{-j\varphi_{\text{п}}} - \frac{1}{3} I_{\text{л}} e^{-j(120+\varphi_{\text{л}})} \right), \quad (10)$$

где $X_{\Sigma} = X_B + X_T + X_{\text{вх}}$.

На векторной диаграмме (рис. 4) показаны падения напряжений на индуктивных и ёмкостном сопротивлениях. По индуктивным сопротивлениям обмоток трансформатора и входном сопротивлении СВЭ протекает часть тока плеч питания, которая учитывается двумя третями тока одного плеча и одной третью тока другого плеча.

Падение напряжения на УПК $\Delta \dot{U}_{\text{УПКО}}$, включённом в фидер обратного тока, определяем по формуле

$$\Delta \dot{U}_{\text{УПКО}} = -jX_{\text{УПКО}} (I_{\text{п}} e^{-j\varphi_{\text{п}}} - I_{\text{л}} e^{-j(120+\varphi_{\text{л}})}). \quad (11)$$

Следовательно, сумма падений напряжения на устройстве УПК, установленном в фидере обратного тока, и напряжения на индуктивных сопротивлениях от токов плеч не равны нулю:

$$\Delta \dot{U}_{\text{лх}\Sigma} + \Delta \dot{U}_{\text{УПКл}} \neq 0, \quad (12)$$

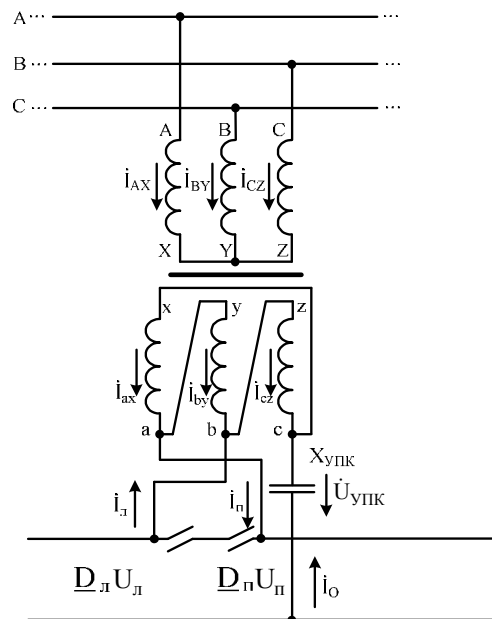


Рис. 3. Расчетная схема распределения токов и напряжений в СТЭ и СВЭ

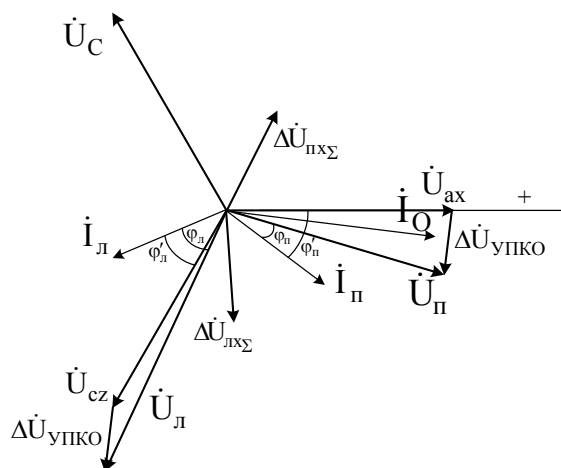


Рис. 4. Векторная диаграмма токов и напряжений плеч при УПК в фидере обратного тока

$$\Delta \dot{U}_{\text{пх}\Sigma} + \Delta \dot{U}_{\text{УПКп}} \neq 0. \quad (13)$$

При токах плеч, равных 800 А, и углу сдвига относительно питающего напряжения, равного 37° , сопротивлении УПК, равного 2,5 Ом, разность напряжений по плечам питания составляет 3,5 кВ.

Выравнивание напряжения плеч питания от токов плеч в диссертации предложено установкой УПК в фидерах левого, правого плеча и обратного тока.

Для левого и правого плеча питания падение напряжения на ёмкостных сопротивлениях, компенсирующих падение напряжения на индуктивных сопротивлениях, определяем по следующим формулам:

$$\Delta \dot{U}_{\text{УПКл}} = -j \frac{1}{3} X_{\Sigma} (2I_{\text{л}} e^{-j(120+\varphi_{\text{л}})} - I_{\text{п}} e^{-j\varphi_{\text{п}}}), \quad (14)$$

$$\Delta \dot{U}_{\text{УПКп}} = -j \frac{1}{3} X_{\Sigma} (2I_{\text{п}} e^{-j\varphi_{\text{п}}} - I_{\text{л}} e^{-j(120+\varphi_{\text{л}})}). \quad (15)$$

Сопротивления УПК, принятые равными одной трети суммарного индуктивного сопротивления обмоток трансформатора и входного сопротивления СВЭ, приводят к выравниванию напряжения от токов плеч питания при соблюдении условий, определяемых по формуле

$$X_{\text{УПКл}} = \frac{1}{3} X_{\Sigma}, \quad X_{\text{УПКп}} = \frac{1}{3} X_{\Sigma}, \quad X_{\text{УПКо}} = \frac{1}{3} X_{\Sigma}. \quad (16)$$

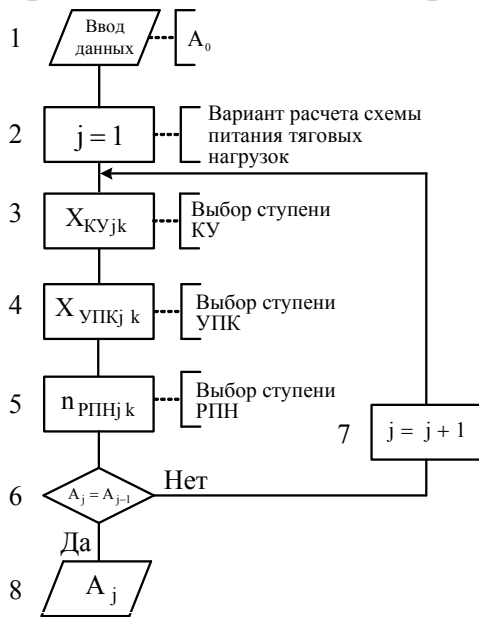
Устройства УПК, установленные в фидерах плеч питания и обратного тока, выравнивают напряжения плеч при любых значениях токов плеч:

$$\Delta \dot{U}_{\text{лх}\Sigma} + \Delta \dot{U}_{\text{УПКл}} = 0, \quad (17)$$

$$\Delta \dot{U}_{\text{пх}\Sigma} + \Delta \dot{U}_{\text{УПКп}} = 0. \quad (18)$$

При этом ступень УПК выбирается на прогнозный интервал времени схем питания тяговых нагрузок.

Управление показателями работы СТЭ выполняется выбором ступеней устройств регулирования напряжения.



5. Блок-схема моделирующего алгоритма выбора ступеней устройств регулирования напряжения на шинах подстанции

Блок-схема моделирующего алгоритма выбора ступеней устройств регулирования напряжения в тяговой сети для интервала времени представлена на рис. 5.

Принятые условные обозначения исходных данных представлены в виде матриц. Матрицы исходных данных моделирующего алгоритма ($[A_0]$) состоят из матриц исходных данных прогнозных токов плеч, напряжений в тяговой сети, возможных ступеней выбора КУ ($[A_{\text{КУ}}]$), УПК ($[A_{\text{УПК}}]$) и РПН ($[A_{\text{РПН}}]$). Порядковый номер варианта расчета для интервала времени определяется индексом j , тогда как порядко-

вый номер ступени регулирования УПК, установок КУ и РПН – индексом k соответственно.

Содержание блоков моделирующего алгоритма представлено в табл. 1. Алгоритм выбора ступеней устройств регулирования в целях повышения напряжения предусматривает следующее:

1. Выбор ступени КУ для снижения модуля тока плеча компенсацией индуктивной составляющей тяговых нагрузок, при этом ток устройства поперечной компенсации k-той ступени $I_{КУk}$ определяем по формуле

$$I_{КУk} = \frac{U_{пл}}{X_{КУk}},$$

где $U_{пл}$ – напряжение, питающее плечо;

$X_{КУk}$ – сопротивление устройства КУ k-той ступени.

2. Ступень УПК определяем таким образом, чтобы падение напряжения на индуктивном сопротивлении в фазе, питающей плечо, компенсировалось падением напряжения на ёмкостном сопротивлении. Поставленная задача решается посредством определения ступени, обеспечивающей максимальное приближение к значению одной трети индуктивного сопротивления обмоток тягового трансформатора и входного сопротивления СВЭ.

3. Ступень РПН выбираем таким образом, чтобы напряжение плеча с максимальным значением приближалось к предельно допустимому. При этом среднее 3-минутное его значение не должно превышать предельно допустимого.

Таблица 1

Содержание блоков моделирующего алгоритма выбора устройств регулирования напряжения в тяговой сети

Номер блоков	Содержание
1	Ввод исходных данных $[A_0]$
2	Выбор первого варианта нормализации схем питания тяговых нагрузок
3	Выбор ступени КУ
4	Выбор ступени УПК
5	Выбор ступени РПН тягового трансформатора
6	Проверка соответствия выбранных в блоках 3, 4 и 5 ступеней в текущем и предыдущем вариантах
7	Переход к следующему варианту
8	Вывод выбранных ступеней регулирования напряжения

Выбор ступеней устройств регулирования напряжения завершён при равенстве значений по последнему и предыдущему вариантам расчёта схемы питания тяговых нагрузок.

В главе 3 представлено снижение потерь электроэнергии посредством выбора схем питания тяговой сети, числа тяговых трансформаторов в работе и применение нового поста секционирования, выполненного по схеме четырёхугольника для меж-

подстанционных зон с большой разностью напряжений на шинах смежных тяговых подстанций, питающих одну межподстанционную зону.

Кроме того, рассмотрено, каким образом устройства УПК, включенные в фидер обратного тока, влияют на разность напряжений на шинах тяговых подстанций, питающих одну зону. Расчетная схема приведена на рис. 6.

Падения напряжения на сопротивлениях УПК для первой $\dot{U}_{\text{УПК}1}$ и второй $\dot{U}_{\text{УПК}2}$ подстанций определяем по формулам:

$$\dot{U}_{\text{УПК}1} = -jX_{\text{УПК}1} (I_{\text{л}1} e^{j(120-\varphi_{\text{л}1})} - I_{\text{п}1} e^{-j(120+\varphi_{\text{п}1})}), \quad (19)$$

$$\dot{U}_{\text{УПК}2} = -jX_{\text{УПК}2} (I_{\text{л}2} e^{-j\varphi_{\text{л}2}} - I_{\text{л}2} e^{-j(120+\varphi_{\text{л}2})}). \quad (20)$$

Установлено, что устройства продольной компенсации, включенные в фидер обратного тока, приводят к появлению дополнительных потерь электрической энергии от разности напряжений плеч питания при двусторонней схеме питания.

Результаты расчёта разности падений напряжения на устройствах УПК тяговых подстанций 1 и 2 соответственно при токах левого и правого плеча, равным 1000 А, и сопротивлению УПК, равном 2,5 Ом, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Токи плеч питания, разность падений напряжения на УПК тяговых подстанций, питающих одну межподстанционную зону

№	$\dot{I}_{\text{л}1}, \text{А}$	$\dot{I}_{\text{п}1}, \text{А}$	$\dot{I}_{\text{л}2}, \text{А}$	$\dot{I}_{\text{п}2}, \text{А}$	$\Delta \dot{U}_{\text{УПК}}, \text{кВ}$
1	$1000 e^{-j37}$	$1000 e^{-j37}$	$1000 e^{-j37}$	$1000 e^{-j37}$	$4,33 e^{j23}$
2	$1000 e^{-j37}$	$1000 e^{-j37}$	0	$1000 e^{-j37}$	$5,0 e^{-j7}$

Напряжения на шинах подстанций, питающих одну межподстанционную зону, зависят от падения напряжения токов плеч питания и, прежде всего, на индуктивных сопротивлениях в СВЭ $\Delta \dot{U}_{\text{СВЭ}}$ и СТЭ $\Delta \dot{U}_{\text{СТЭ}}$ и ёмкостном сопротивлении УПК. Как было доказано выше [см. формулы (10), (11), (12) и (13)], при включении УПК в фидер обратного тока падение напряжения на ёмкостном сопротивлении не уравнивает падение напряжения на индуктивном сопротивлении.

Для данного случая уравнивающий ток $\dot{I}_{\text{ур}}$ можно определить по формуле

$$\dot{I}_{\text{ур}} = \frac{(\Delta \dot{U}_{\text{СВЭ}1} + \Delta \dot{U}_{\text{СТЭ}1}) - (\Delta \dot{U}_{\text{СВЭ}2} + \Delta \dot{U}_{\text{СТЭ}2})}{Z_{\text{тс}}}, \quad (21)$$

где $\Delta \dot{U}_{\text{СВЭ}1}$, $\Delta \dot{U}_{\text{СВЭ}2}$ – падения напряжения на индуктивных сопротивлениях в СВЭ тяговых подстанций 1 и 2 соответственно;

$\Delta \dot{U}_{\text{СТЭ}1}$, $\Delta \dot{U}_{\text{СТЭ}2}$ – падения напряжения на индуктивных сопротивлениях в СТЭ тяговых подстанций 1 и 2 соответственно;

$Z_{\text{тс}}$ – комплексное сопротивление контура тяговой сети.

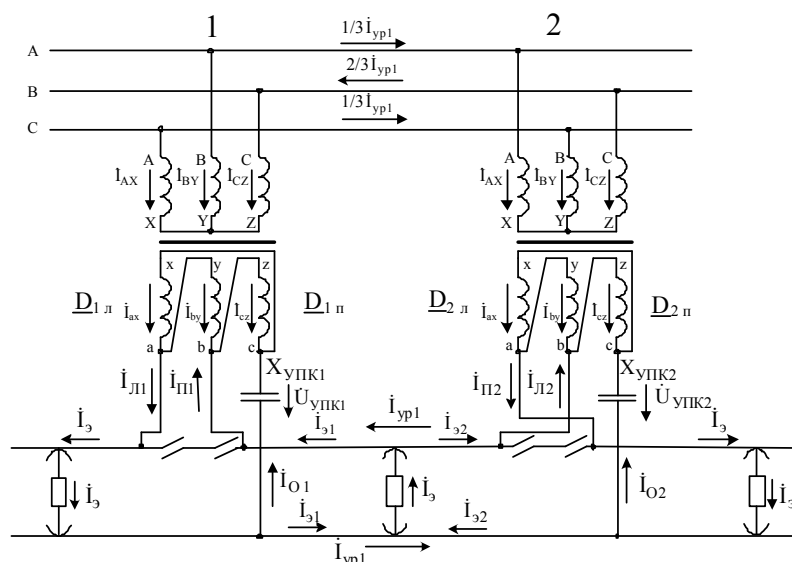


Рис. 6. Схема питания тяговой сети

В работе предложено осуществлять контроль влияния УПК на напряжение тяговых шин. Новизна предложенного решения подтверждена патентом на изобретение № 2694889. Тяговая подстанция переменного тока. Заявл. 19. 04. 2018; опубл. 18. 07. 2019.

Высокая разность напряжений на шинах смежных подстанций от падений напряжений на ёмкостных сопротивлениях УПК первой и второй подстанций может приводить к значительным потерям электрической энергии, повышению нагрузки тяговой сети и трансформаторов, более того, не обеспечивает соответствие схем питания тяговой сети по второй форме нормальных схем.

Включение УПК в фидеры левого, правого и обратного тока существенного влияния на уравнительный ток от токов плеч не оказывает при соблюдении выполнения условий, определенных формулой 16.

В целях снижения потерь электрической энергии в работе предложено осуществлять мониторинг за расходом и потреблением электроэнергии.

Расход электроэнергии на тягу поездов W_T на межподстанционной зоне определяем по плечам питания по формуле

$$W_T = W_{Tj} + W_{Tj+1}, \quad (22)$$

где $W_{Tj}; W_{Tj+1}$ – суммарный расход электроэнергии на тягу поездов тяговых подстанций j и $j+1$ за расчетный период времени.

Электрическую энергию, потреблённую электроподвижным составом $W_{эпс}$, определяем устройствами коммерческого учета по формуле

$$W_{эпс} = \sum_{i=1}^m W_{эпс i}. \quad (23)$$

Местоположение ЭПС на межподстанционной зоне определяется посредством систем навигации и передаётся в центр анализа потребления электроэнергии.

В этом случае потери электрической энергии ΔW определяем по формуле

$$\Delta W = W_T - W_{эпс}.$$

Потери электроэнергии прогнозных схем питания при узловой ΔW_2 и петлевой ΔW_1 определяем по следующим формулам соответственно:

$$\Delta W_2 = \Delta W_{T2} + \Delta W_{K2} + \Delta W_{д} + \Delta W_{св}, \quad (24)$$

$$\Delta W_1 = \Delta W_{T1} + \Delta W_{K1}. \quad (25)$$

Значение разности потерь электроэнергии $\Delta W'$ в тяговой сети является критерием выбора схем питания тяговой сети на интервал времени, которую определяем по формуле

$$\Delta W' = \Delta W_1 - \Delta W_2. \quad (26)$$

При $\Delta W' > 0$ целесообразно по потерям электрической энергии переходить к узловой схеме питания тяговой сети, а при $\Delta W' < 0$ – к петлевой схеме.

В целях снижения потерь электрической энергии в СТЭ предложено учитывать потери в тяговых трансформаторах. Кроме того, число трансформаторов в работе выбирается таким, при котором потери электрической энергии будут минимальными:

$$\Delta W_n \Rightarrow \min.$$

Потери мощности при n в работе трансформаторов практически определяются суммой номинальных потерь мощности не только в стали $\Delta P_{СТ}$, но и в меди ΔP_M по формуле

$$\Delta P_n = n\Delta P_{СТ} + \frac{1}{n}\Delta P_M. \quad (27)$$

В диссертации предлагается при расчете потерь мощности в стали учитывать несимметрию напряжений обмоток напряжением прямой U_1 и обратной U_2 последовательности по формулам:

$$\Delta P_{ст1} = \Delta P_{xx} \left(\frac{U_1}{U_{НОМ}} \right)^2, \quad \Delta P_{ст2} = \Delta P_{xx} \left(\frac{U_2}{U_{НОМ}} \right)^2. \quad (28)$$

Определение потерь мощности в стали с учётом реальной для тяговых подстанций несимметрии напряжений повышает точность расчёта до 30 %.

Сопротивление обмоток рассчитываем с учетом действительных коэффициентов трансформации и температуры обмоток по формуле

$$\Delta P_M = (I_{AX}^2 + I_{BY}^2 + I_{CZ}^2)R_{Bt} + (I_{ax}^2 + I_{by}^2 + I_{cz}^2)R_{Tt} + \frac{P_P^2 + Q_P^2}{U_P^2} R_{Pt} \quad (29)$$

Сопротивление обмоток $R_{обмt}$ рассчитываем с учетом не только температуры обмоток $t_{обм}$ по температурному коэффициенту сопротивления α , но и действительного коэффициента трансформации $\Delta R_{обм20}$:

$$R_{обмt} = (R_{обм20} + \Delta R_{обм20})[1 + \alpha(t_{обм} - 20)]. \quad (30)$$

Несимметрию токов при определении потерь в меди ΔP_M учитываем пофазным расчётом. Определение потерь мощности в меди с учётом несимметрии токов в обмотках повышает точность расчёта до 50 %.

При изменении температуры обмоток тягового трансформатора в диапазоне от -40°C (момент включения трансформатора при температуре окружающей среды

- 40°C) до +70 °С расчет нагрузочных потерь без учета температурного коэффициента сопротивления даёт погрешность до 27 %.

На основании изложенного выше потери электроэнергии предложено определять исходя из потерь мощности для одного и двух в работе тяговых трансформаторов в интервале времени по формулам:

$$\Delta W_1 = \left(\sum_{i=1}^m \Delta P_{1i} \right) \Delta t, \quad \Delta W_2 = \left(\sum_{i=1}^m \Delta P_{2i} \right) \Delta t, \quad (31)$$

где Δt – время мгновенной схемы;

m – число мгновенных схем в интервале времени.

Критерием выбора числа в работе трансформаторов являются минимальные потери электрической энергии, определяемые по формуле

$$\Delta W' = \Delta W_1 - \Delta W_2.$$

При $\Delta W' > 0$ – число трансформаторов в работе принимается равным двум, а при $\Delta W' < 0$ – один трансформатор в работе.

Повышение работоспособности СТЭ в настоящем исследовании выполнено способом защиты тягового трансформатора от внутренних повреждений.

Дифференциальная защита силового трансформатора общеизвестна. Принцип действия защиты заключается в определении баланса токов со стороны напряжений высшего, тягового и районного.

Отключение трансформатора высоковольтными выключателями происходит при срабатывании устройства РЗА при заданном небалансе токов по следующим формулам:

$$\dot{I}_p = k_1 \dot{I}_{IV} + k_2 \dot{I}_{IIВ} \quad (32)$$

где \dot{I}_{IV} ; $\dot{I}_{IIВ}$ – вторичные токи измерительных трансформаторов тока;

k_1 , k_2 – коэффициенты распределения токов;

\dot{I}_p – ток реле.

Условие срабатывания защиты определяем соотношением

$$\dot{I}_{сз} \geq k_{сз} \dot{I}_p, \quad (33)$$

где $\dot{I}_{сз}$ – ток срабатывания защиты;

$k_{сз}$ – коэффициент срабатывания защиты.

Важно заметить, что дифференциальная защита не учитывает потери мощности в стали и меди, в результате этого возникает погрешность определения внутренних повреждений тягового трансформатора.

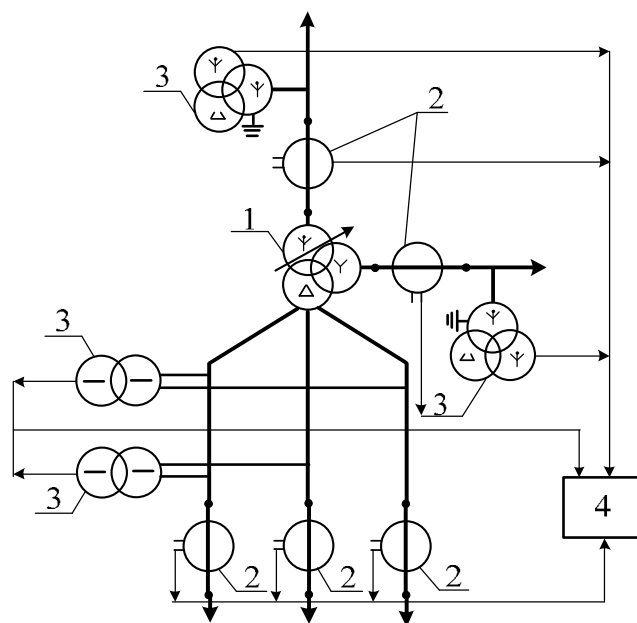


Рис.7. Расчётная схема защиты трансформатора от внутренних повреждений

В настоящем исследовании представлен разработанный новый способ защиты силового трансформатора тяговых подстанций, основанный на балансе мощностей ΔP (рис. 7), который рассчитывается по формуле

$$\Delta P = P_B - (P_T + P_P + \Delta P_{CT} + \Delta P_M), \quad (34)$$

где P_B , P_T , P_P – мощности вводов напряжений высшего, тягового и районного. Условие срабатывания защиты определяется по формуле

$$\Delta P_{сз} > k_{сз} \Delta P. \quad (35)$$

Расчётные значения потерь мощности в трансформаторах, с учётом несимметричных напряжений ΔP_{CT} и токов обмоток ΔP_M , которые определяются по формулам 28 и 29, обеспечивают повышение точности срабатывания защиты.

При этом важно заметить, что определение только на ранней стадии внутренних повреждений в тяговом трансформаторе и его отключение может предотвратить появление тяжёлых последствий, в том числе включая и пожары.

Новизна способа защиты тягового трансформатора от внутренних повреждений подтверждена патентом на изобретение РФ № 2710023, опубл. 24.12.2019 г.

В главе 4 изложены результаты выполненного анализа показателей работы СТЭ на ДВОСТЖД. По результатам анализа установлено, что на ДВОСТЖД имеются межподстанционные зоны, которые при применении узловых схем питания подвергаются существенным потерям электрической энергии, перегрузке тяговой сети и трансформаторов. Более того, возрастание уравнивающих токов ограничивает возможность повышения напряжения в тяговой сети при выборе ступени РПН.

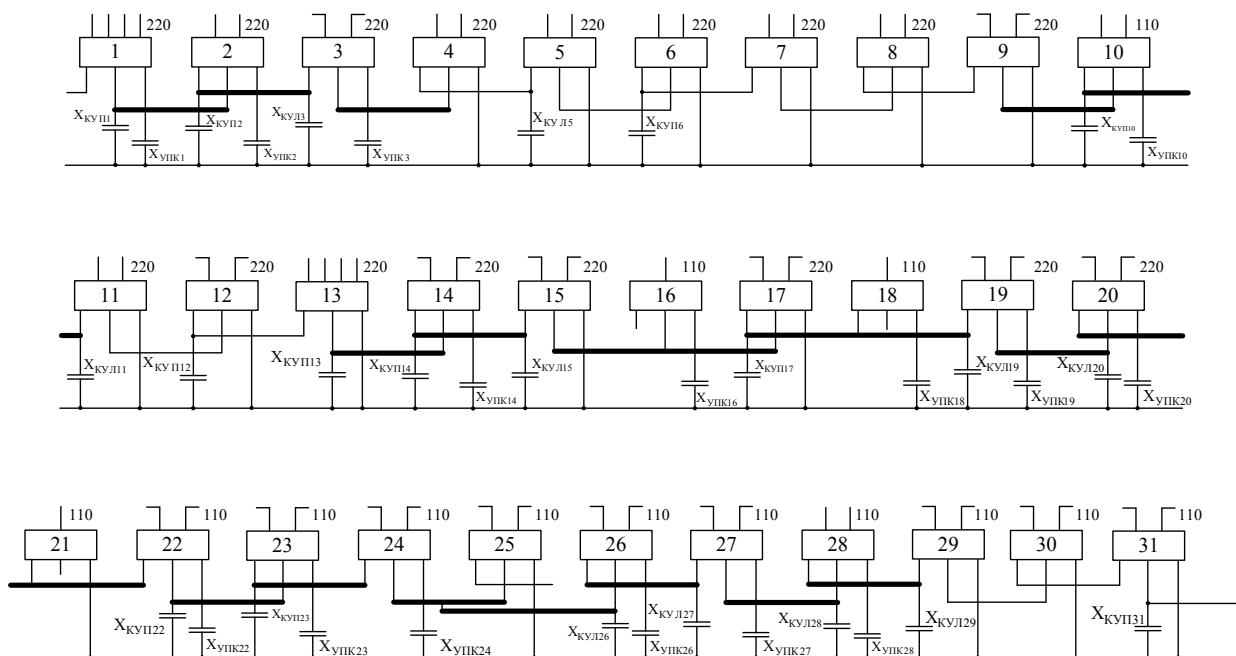


Рис. 8. Структурная схема СТЭ на ДВОСТЖД

Тяговые и подпитывающие подстанции системы тягового электроснабжения подключены к ЛЭП напряжением 220 и 110 кВ системы внешнего электроснабжения. На структурной схеме СТЭ на ДВОСТЖД (рис. 8) показано подключение 28 тя-

говых и 3 подпитывающих подстанций. Тяговые подстанции подключены к ЛЭП 220 или 110 кВ. Подпитывающие подстанции подключены к ЛЭП 110 кВ.

Подпитывающие подстанции занимают особое место в системе тягового электроснабжения ДВОСТЖД, поскольку они относятся к нетиповым.

Анализ эффективности работы подпитывающих подстанций, выполненный в диссертации, подтверждает низкие технико-экономические показатели данных подстанций. Пример результатов контрольных замеров на одной из них, выполненных на 20 июня 2018 г., приведен на гистограмме (рис. 9).

На рис. 9 нетрудно видеть, что представлены следующие значения напряжений: максимальное – 27,6 кВ, что соответствует времени 17:45, среднее – 25,89 кВ, минимальное – 21,4 кВ, что соответствует времени 3:30. Значения отношения реактивной энергии к активной: максимальное – 4, среднее – 1,66, минимальное – 1.

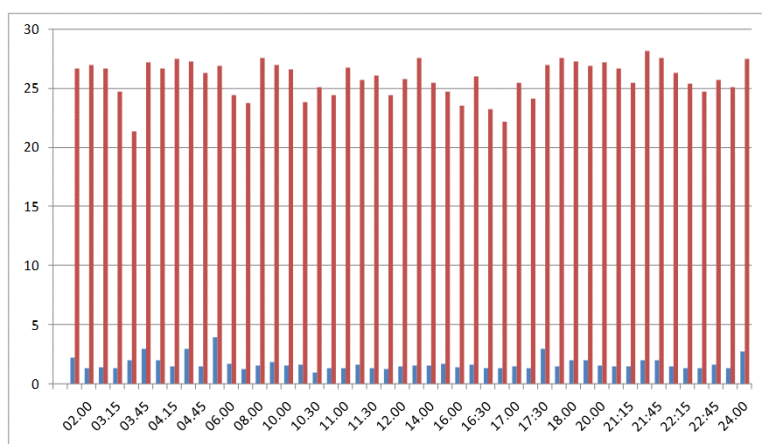


Рис. 9. Гистограмма результатов контрольных замеров на подпитывающей подстанции на 20.06.2018 г.:

■ W_p/W_a – отношения реактивной энергии к активной, ■ U – напряжение, кВ

Результаты контрольных замеров на 19.12.2018 г приведены на гистограмме (рис. 10), где представлены следующие значения напряжений: максимальное – 29,7 кВ, что соответствует времени 4:30, среднее – 26,4 кВ, минимальное – 21,9 кВ – что соответствует времени 11:00 и 11:15.

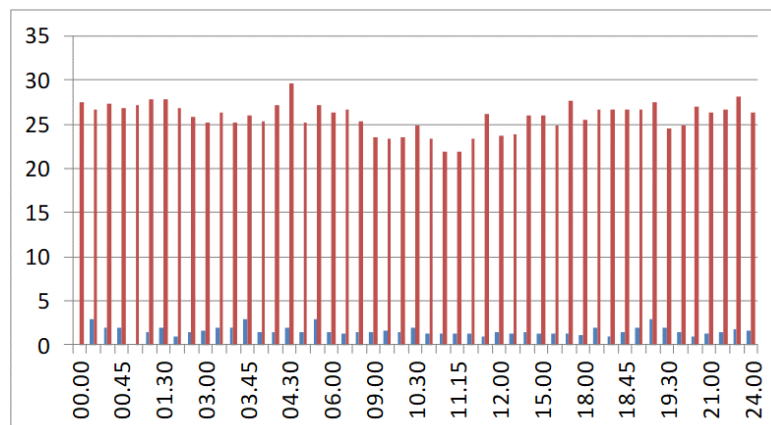


Рис. 10. Гистограмма результатов контрольных замеров на подпитывающей подстанции на 19.12.2018 г.:

■ W_p/W_a – отношения реактивной энергии к активной, ■ U – напряжение, кВ

Значения отношения реактивной энергии к активной следующие: максимальное – 3, среднее – 1,43, минимальное – 1.

Полученные результаты подтверждают необходимость приведения схем питания тяговых нагрузок от подпитывающих подстанций к нормальным схемам по разработанным формам.

На структурной схеме (рис. 8) выделена 21 межподстанционная зона, которые по условиям работы не могут быть приведены к нормальным схемам питания тяговых нагрузок.

Значительные уравнивающие токи на 7 зонах возникают в силу того, что смежные подстанции, питающие одну межподстанционную зону, подключены к ЛЭП с различными классами напряжения – 220 и 110 кВ. К ним относятся зоны, которые подключены к подстанциям 9 и 10, 10 и 11, 15 и 16, 16 и 17, 17 и 18, 18 и 19, 20 и 21.

Для этих зон необходимо осуществлять мероприятия, направленные на снижение не только дополнительных потерь электроэнергии, но и нагрузок, как в тяговой сети, так и трансформаторах.

Значительные уравнивающие токи на 21-й зоне являются следствием включения УПК в фидер обратного тока на подстанциях. Эти зоны подключены к следующим подстанциям 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4, 9 и 10, 10 и 11, 13 и 14, 14 и 15, 15 и 16, 16 и 17, 17 и 18, 18 и 19, 19 и 20, 20 и 21, 21 и 22, 22 и 23, 23 и 24, 24 и 25, 24 и 26, 26 и 27, 27 и 28, 28 и 29.

При этом важно отметить, что межподстанционные зоны, ограниченные подстанциями 1-2, 5-6, 6-7, 9-10, 16-17, 20-21, 23-24, 25-26, 30-31 (9 зон), не оборудованы постами секционирования. Именно это и является причиной снижения работоспособности функционирования СТЭ.

В целях повышения эффективности работы СТЭ следует привести в соответствие схемы питания тяговых нагрузок к нормальным схемам. При этом указанные зоны следует перевести с узловой на петлевую схему питания тяговой сети.

Для межподстанционных зон при значительных дополнительных потерях электрической энергии от разности напряжения, создаваемой системой тягового и (или) внешнего электроснабжения, применяется переход к петлевой схеме питания. В этом случае применяется пост секционирования контактной сети (рис. 11), который выполнен по схеме одна секционированная выключателем система шин на четыре присоединения.

Экономическая эффективность применения петлевой схемы питания отдельных межподстанционных зон тяговой сети переменного тока для Дальневосточной, Забайкальской, Красноярской железных дорог доказана данными результатов исследований профессора Черемисина В.Т. Например, годовой экономический эффект на момент внедрения на посту секционирования Приамурский ДВОСТЖД составил 158 тыс.руб., а экономия электроэнергии за 2004 год – 94 тыс. кВт·ч соответственно.

Поперечное секционирование осуществляется двумя последовательно включёнными выключателями ($B11$, $B12$ и $B21$, $B22$), а продольное секционирование – тремя выключателями ($B11$, BC , $B21$ и $B12$, BC , $B22$). Раздел тяговой сети должен быть выполнен открытым воздушным промежутком. Проходу токоприёмника по

разделу тяговой сети также должно предшествовать включение секционного выключателя.

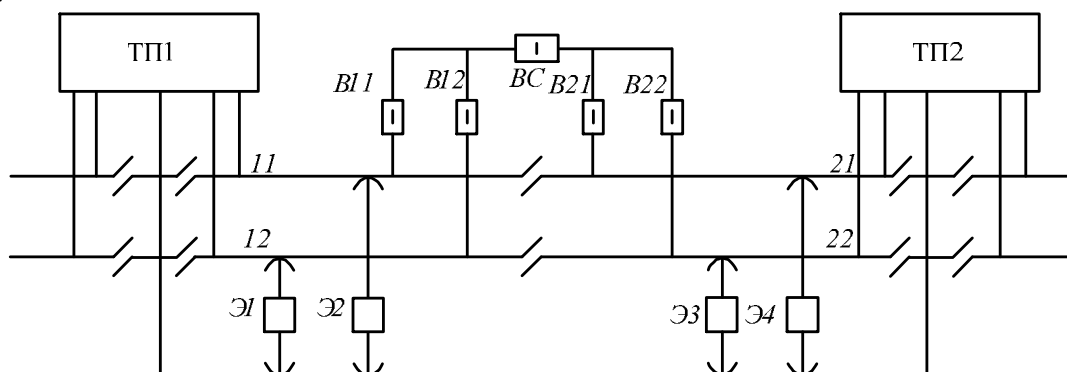


Рис. 11. Общепринятая схема тяговой сети для снижения дополнительных потерь электроэнергии

Отказ включения секционного выключателя (ВС) перед проходом токоприёмника приводит к технологическому нарушению.

Для участков с большими потерями дополнительной электрической энергии в диссертации предлагается новый пост секционирования, выполненный по схеме четырёхугольника с нейтральной вставкой (рис. 12).

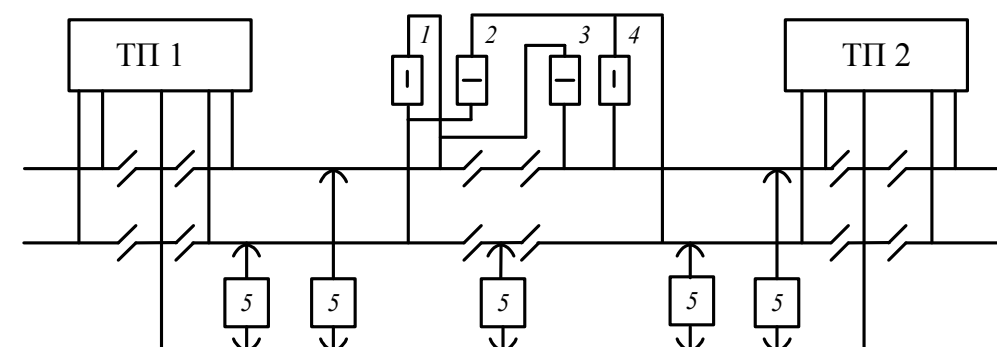


Рис. 12. Предлагаемая схема тяговой сети для снижения дополнительных потерь электроэнергии

Выключатели 1 и 4 выполняют поперечное секционирование контактной сети. Выключатели 2 и 3 осуществляют продольное секционирование контактной сети. Включённое положение выключателей 1 и 4 и отключённое положение выключателей 2 и 3 обеспечивает петлевую схему питания поездов на интервалы времени или расчетный период. Включённое положение выключателей 1, 2, 3 и 4 обеспечивает узловую схему питания тяговой сети.

Основное преимущество новой схемы заключается в меньшем числе выключателей и повышении работоспособности СТЭ. Новизна устройства подтверждена патентом на изобретение № 2706634, опубл. 19.11.2019 г.

В настоящем исследовании для выделенных 7 межподстанционных зон (см. рис. 8) со значительными уравнительными токами приведены расчёты годовых потерь электрической энергии, кроме того, представлена экономическая оценка потерь для различных значений эффективного уравнительного тока. К ним относятся зоны,

которые подключены к подстанциям 9 и 10, 10 и 11, 15 и 16, 16 и 17, 18 и 19, 19 и 20, 22 и 23.

Экономия текущих расходов $C_{\text{эк}}$, тыс. руб./год, при снижении дополнительных потерь электроэнергии определена по формуле

$$C_{\text{эк}} = \Delta P_{\text{д}} \cdot 8760 C_{\text{э/э}}, \quad (36)$$

где $C_{\text{э/э}}$ – тариф на электроэнергию, руб./кВт·ч.

Тариф на электроэнергию для ДВОСТЖД принимаем равным: $C_{\text{э/э}} = 2,61$ руб./кВт·ч.

Протекание уравнительных токов в 100, 150 и 200 А по межподстанционной зоне длиной 55 км за год вызывает дополнительные потери электроэнергии, стоимость которых составляет 1212, 2727 и 4847 тыс. руб. соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании выполнения встречного интервального управления показателей работы СТЭ для обеспечения соответствия схем питания тяговых нагрузок критерию норма разработана методика выбора прогнозных интервалов времени.

2. Разработана методика определения рациональных значений сопротивлений и мест включения УПК, применение которой позволяет обеспечить снижение разности напряжения плеч питания и напряжений на шинах смежных подстанций. Новизна решения подтверждена патентом на изобретение.

3. Уточнена методика определения потерь электрической энергии в тяговых трансформаторах, которая повышает точность расчета при учёте несимметрии напряжений до 30 %, токов – до 50 % и температуры обмоток – до 27 %.

4. Определена 21 зона на ДВОСТЖД с потерями электрической энергии от уравнительных токов, каждая из которых приводит к экономическому ущербу в размере от 1212 до 4847 тыс. руб. за год.

5. Предложено новое решение выполнения петлевой схемы питания тяговой сети для межподстанционных зон с большими уравнительными токами, состоящее в применении поста секционирования по схеме четырёхугольника, который обеспечивает снижение годового энергопотребления на ДВОСТЖД до 1857 МВт·ч на межподстанционной зоне. Новизна решения подтверждена патентом на изобретение.

6. В целях повышения эффективности СТЭ разработан способ защиты тяговых трансформаторов, основанный на балансе мощностей, который позволяет повысить точность срабатывания релейной защиты тягового трансформатора на тяговых подстанциях переменного тока напряжением 25 кВ. Новизна решения подтверждена патентом на изобретение.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статья, в журнале, входящем в международную систему цитирования Scopus

1. Vlasevsky, S. V. Opposing Regulation of Performance Factors in an Alternating-Current Traction Power-Supply System / S. V. Vlasevsky, N. P. Grigoriev and P. N. Trofimovich // Russian Electrical Engineering ISSN 1068-3712. Vol. 90, No. 7, 2019. – pp.522-525.

Статьи в журналах и изданиях перечня ВАК Российской Федерации

2. Григорьев Н.П., Давыдов Ю.А., Парфианович А.П., Трофимович П.Н. Снижение потерь электрической энергии в системе тягового электроснабжения переменного тока // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 4(41). – С. 36-40.

3. Григорьев, Н. П., Марченко, Л. В., Парфианович, А. П., Трофимович, П. Н. Повышение эффективности работы системы переменного тока 25 кВ // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2019. – № 2. – С. 15-17.

4. Власьевский, С.В. Григорьев, Н.П., Трофимович, П.Н. Встречное регулирование показателей работы в системе тягового электроснабжения переменного тока // Электротехника. – 2019. – № 7 – С. 50–53.

5. Григорьев, Н.П., Трофимович, П.Н. Повышение эффективности работы системы тягового электроснабжения устройствами продольной компенсации // Электромеханика. – 2019. – №3. – С. 64-68.

Патенты

6. Пат. 2694889 Российская Федерация, МПК H02B 5/00 (2006.01). Тяговая подстанция переменного тока : пат. Р.Ф. / Григорьев Н.П., Парфианович А.П., Трофимович П.Н.; заявитель и патентообладатель Дальневосточный гос. ун-т. путей сообщения. – № 2018114580 : заявл. 19.04.2018; опубл. 18.07.2019, Бюл. № 20. – 2 с. : ил.

7. Пат. 2706634 Российская Федерация, МПК B60M 3/04 (2006.01). Устройство тяговой сети переменного тока : пат. Р.Ф. / Григорьев Н.П., Парфианович А.П., Трофимович П.Н.; заявитель и патентообладатель Дальневосточный гос. ун-т. путей сообщения. – № 2018135346 : заявл. 05.10.2018; опубл. 19.11.2019; Бюл. №32. – 2 с. : ил.

8. Пат. 2710023 Российская Федерация, МПК H02H 7/045 (2006.01). Способ защиты силового трансформатора тяговых подстанций переменного тока от внутренних повреждений : пат. Р.Ф. / Григорьев Н.П., Дынькин Б.Е., Парфианович А.П., Трофимович П.Н.; заявитель и патентообладатель АНО “Университет” – № 2018118911 : заявл. 22.05.2018; опубл. 24.12.2019, Бюл. № 36. – 2 с. : ил.

Прочие публикации

9. Григорьев Н.П., Трофимович П.Н. Влияние устройств продольной компенсации на напряжение в тяговой сети // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Девятой междунар. науч.-практ. конф., 10 – 13 апреля 2018 г. В 2 т. Т 1. Иркутск: ИрГУПС, 2018. – С. – 622–624.

10. Григорьев Н.П., Титов А.Ф., Трофимович П.Н. Расчет потерь мощности в стали силовых трансформаторов тяговых подстанций переменного тока // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Девятой междунар. науч.-практ. конф., 10 – 13 апреля 2018 г. В 2 т. Т 1. – Иркутск : ИрГУПС, – 2018. – С. 664–667.

11. Григорьев Н.П., Трофимович П.Н. Анализ эффективности схем питания тяговых нагрузок в системе переменного тока // Электропривод на транспорте и в промышленности : тр. II всерос. науч.-практ. конф., 20–21 сентября 2018 г. / под ред. С.В. Власьевского. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС. – 2018. – С. 383–387.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Трофимович Полина Николаевна

План 2020 г. Подписано в печать
Уч.-изд. л. . Усл. печ. л. . Зак. . Тираж 100 экз.

Издательство ДВГУПС
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47