

На правах рукописи



КОВАЛЕВ Владимир Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
СИСТЕМ ВНЕШНЕГО И ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА 25 КВ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Хабаровск – 2024

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

Научный руководитель: **Кандидат технических наук, доцент
Григорьев Николай Потапович**

Официальные оппоненты: **Герман Леонид Абрамович,**
доктор технических наук, профессор,
филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» в городе Нижнем Новгороде, профессор кафедры «Техника и технология железнодорожного транспорта»

Юшкова Ирина Анатольевна,
кандидат технических наук,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», доцент кафедры «Электроснабжение транспорта»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится «02» июля 2024 г. в 17:30 на заседании диссертационного совета 44.2.001.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС) по адресу: Россия, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, дом 47, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО ДВГУПС и на сайте (<https://dvgups.ru/>) в разделе «Аспиранту» – «Диссертационные советы» – «Диссертационный совет 44.2.001.01 (Д 218.003.07)» – «Объявления о защитах».

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета 44.2.001.01 по адресу: Россия, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, дом 47.

Автореферат разослан «29» апреля 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Ю.С. Кабалык

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В рамках реализации «Транспортной стратегией РФ» поставлена цель повышения провозной способности Восточного полигона железных дорог к 2035 г. до 305 млн. тонн. Особое место при этом занимают Транссибирская и Байкало-Амурская магистрали в направлении портов Хабаровского и Приморского края для дальнейшего экспорта грузов в страны Азиатско-Тихоокеанского региона.

Важнейшей задачей «Транспортной стратегии РФ» является ликвидация «узких мест» на транспортной сети железных дорог, которые ограничивают увеличение скорости и весовых норм поездов. В качестве одного из механизмов устранения «узких мест» стратегия предусматривает реконструкцию и модернизацию систем тягового электроснабжения.

«Стратегия научно-технического развития холдинга ОАО "РЖД" на период до 2020 года и перспективу до 2025 года» предусматривает переход от реактивного управления на основе информационных баз данных и реагирования на произошедшие события к прогнозному, снижение эксплуатационных расходов на выполнение перевозочного процесса и продление срока службы дорогостоящего оборудования.

Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» предусматривает полное и надежное энергообеспечение перевозочного процесса и снижение потерь электроэнергии в системах тягового и внешнего электроснабжения от токов тяговых нагрузок, которые увеличивают энергоемкость и стоимость перевозки грузов и пассажиров.

В диссертационной работе рассмотрены вопросы, направленные на повышение эффективности взаимодействия систем внешнего (далее – СВЭ) и тягового (далее – СТЭ) электроснабжения переменного тока 25 кВ в целях выполнения задач, сформулированных программами стратегического развития железных дорог.

Таким образом, тема диссертационной работы «Повышение эффективности взаимодействия систем внешнего и тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ» является актуальной в связи с соответствием рассмотренных задач содержанию стратегических программ.

Цель исследования – снижение потерь напряжения, мощности, электрической энергии в СТЭ переменного тока 25 кВ и СВЭ от токов тяговых нагрузок и интенсивности термического износа изоляции обмоток силовых трансформаторов тяговых подстанций.

Для достижения поставленной цели определены следующие **задачи**.

1. Выполнить анализ взаимодействия СТЭ переменного тока 25 кВ и СВЭ на примере ДВЖД, оценку потерь напряжения, мощности и электроэнергии от токов тяговых нагрузок в целях определения и устранения «узких мест» для обеспечения перевозочного процесса при перспективных условиях, определенных стратегическими программами развития железной дороги России.

2. Усовершенствовать методику расчета токов плеч питания тяговых подстанций в СТЭ переменного тока 25 кВ в целях повышения точности определения прогнозных показателей взаимодействия систем внешнего и тягового электроснабжения.

3. Разработать алгоритм определения временных входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП в интервалах времени.

4. Разработать базу данных сопротивлений ветвей схемы замещения СВЭ, питающей СТЭ ДВЖД.

5. Разработать алгоритм определения рационального количества интервалов времени выбора схем питания прогнозных тяговых нагрузок расчетного периода.

6. Разработать новые схемы присоединения тяговых подстанций участка ДВЖД Ласточка – Сибирцево к тяговой сети и ЛЭП.

7. Выполнить оценку технико-экономической эффективности разработанных мероприятий.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации, состоит: в определении коэффициента распределения токов электроподвижного состава (далее – ЭПС) по плечам тяговых подстанций с учетом временных входных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП, что повысило достоверность анализа распределения токов тяговых нагрузок в СТЭ и СВЭ, разработке базы данных сопротивлений элементов системы внешнего электроснабжения в целях расчета временных входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП, разработке алгоритма нормализации количества интервалов времени выбора схем питания тяговых прогнозных нагрузок, определении «узкого места» перспективного движения поездов в системе тягового электроснабжения ДВЖД, разработке новых схем присоединения тяговых подстанций участка Ласточка - Сибирцево к ЛЭП и тяговой сети.

В диссертационной работе сформулирована **гипотеза**: повышение эффективности взаимодействия систем тягового и внешнего электроснабжения достигается информационным моделированием нормализации схем питания тяговых нагрузок и схем присоединения тяговых подстанций к ЛЭП и тяговой сети.

Степень разработанности темы исследования.

Теоретической основой диссертационной работы служат результаты исследований отечественных и зарубежных ученых и специалистов в области электроэнергетики и электроснабжения железных дорог (В.А. Веников, Л.А. Герман, В.П. Закарюкин, Ю.С. Железко, В.И. Идельчик, Б.И. Косарев, А.Б. Косарев, Г.Г. Марквардт, К.Г. Марквардт, Н.А. Мельников, Р.Р. Мамошин, А.С. Серебряков, Э.В. Тер-Оганов, А.И. Тамазов, В.Т. Черемисин, Е.П. Фигурнов, G. Andersson, B. Stott и др.).

Объектом исследования является система тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ при взаимодействии с СВЭ.

Предметом исследования являются потери напряжения, мощности, электроэнергии в СТЭ переменного тока 25 кВ и СВЭ от токов тяговых нагрузок и интенсивность термического износа изоляции обмоток силовых трансформаторов тяговых подстанций.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем.

1. Повышена точность методики расчета распределения токов ЭПС по плечам тяговых подстанций, обмоткам силовых трансформаторов тяговых подстанций (далее – тяговый трансформатор) и фазам ЛЭП на основе информационного моделирования прогнозного состояния систем внешнего и тягового электроснабжения.

2. Предложена новая методика и алгоритм расчета временных значений входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП.

3. Разработан алгоритм расчета рационального количества интервалов времени выбора схем питания прогнозных тяговых нагрузок при встречном интервальном регули-

ровании показателей взаимодействия СТЭ и СВЭ.

Теоретическая и практическая ценность полученных результатов.

1. Предложена методика и алгоритм расчета рационального количества интервалов времени в расчетном периоде в целях определения эффективных схем питания тяговых нагрузок. Программная реализация алгоритма выполнена программой для ЭВМ.

2. Разработана база данных системы внешнего электроснабжения (ЛЭП, силовых трансформаторов и автотрансформаторов подстанций), питающих тяговые нагрузки СТЭ ДВЖД для расчета входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП.

3. Разработано автоматизированное рабочее место расчета временных входных и взаимных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций с учетом положений коммутационных аппаратов и ступеней устройств регулирования напряжения под нагрузкой (далее – РПН) трансформаторов и автотрансформаторов подстанций СВЭ.

4. Доказано, что 13% тяговых подстанций в СТЭ ДВЖД является «узким местом» обеспечения перспективных размеров движения поездов и создают низкую эффективность взаимодействия систем внешнего и тягового электроснабжения.

5. Разработаны новые схемы присоединения тяговых подстанций участка ДВЖД Ласточка – Сибирцево к фазам ЛЭП и тяговой сети, которые обеспечивают снижение потерь напряжения, мощности, электроэнергии в СТЭ и СВЭ, интенсивности термического износа изоляции обмоток тяговых трансформаторов на 4 тяговых подстанциях.

Результаты исследования приняты к использованию Ружинской дистанцией электроснабжения (ЭЧ-6) – структурным подразделением Дальневосточной дирекции по энергообеспечению – структурного подразделения Трансэнерго – филиала открытого акционерного общества «Российские железные дороги».

Научные результаты диссертации нашли применение в ходе реализации учебного процесса кафедры «Системы электроснабжения» ДВГУПС.

Методы исследования.

Результаты диссертационной работы получены при использовании общепринятых положений теории электротехники и электроснабжения электрифицированных железных дорог, линейной алгебры, математической статистики, программирования и информационного моделирования, анализе показателей функционирования реальных устройств системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ.

Расчеты и анализ полученных результатов выполнены с использованием электронных таблиц Microsoft Excel, реляционной системы управления базами данных Microsoft Access и пакета прикладных программ MATLAB.

Положения, выносимые на защиту.

1. Уточненная методика расчета распределения токов ЭПС по плечам тяговых подстанций переменного тока 25 кВ с учетом взаимодействия систем внешнего и тягового электроснабжения.

2. Методика и алгоритм расчета временных входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП с учетом положения коммутационных аппаратов и устройств регулирования напряжения в СВЭ.

3. Алгоритм расчета рационального количества интервалов времени схем питания прогнозных тяговых нагрузок в расчетном периоде.

4. Новые схемы присоединения тяговых подстанций участка СТЭ ДВЖД Ласто-

чка – Сибирцево к фазам ЛЭП и тяговой сети.

Степень достоверности и апробация результатов.

Результаты и выводы выполненной работы получены при использовании классической теории электротехники и закономерностей, полученных в работах ведущих ученых и специалистов в области устройства и функционирования электрических сетей внешнего и тягового электроснабжения.

При выполнении исследования использованы действительная схема электрических сетей СВЭ, питающей СТЭ ДВЖД, а также реальные схемы присоединения тяговых подстанций участка ДВЖД Ласточка – Сибирцево к ЛЭП и тяговой сети.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Научно-техническое и социально-экономическое развитие транспорта и промышленности стран АТР» (г. Хабаровск, 20–23 апреля 2021 г., ДВГУПС), XII Международной научной конференции «TITDS-XII 2021: Транспортная инфраструктура для устойчивого развития территорий» (г. Иркутск, 6–8 октября 2021 г., ИрГУПС), V Международной научно-практической конференции «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению» (г. Комсомольск-на-Амуре, 6–11 декабря 2021 г., КнАГУ), XXIV Краевом конкурсе молодых ученых (г. Хабаровск, 13 января 2022 г., ТОГУ), Молодежном научном форуме «Интеллектуальный потенциал молодежи – Дальневосточному региону» (г. Хабаровск, 19–22 апреля 2022 г., ДВГУПС), Молодежном научном форуме «Интеллектуальный потенциал молодежи – Дальневосточному региону» (г. Хабаровск, 18–21 апреля 2023 г., ДВГУПС), а также заседаниях кафедры «Системы электроснабжения» ДВГУПС и научно-технических семинарах кафедр Электроэнергетического института ДВГУПС (г. Хабаровск, ДВГУПС, 2019–2023 гг.).

Апробация полученных результатов работы подтверждена следующими наградами.

1. Дипломом I степени за научный доклад на тему «Повышение эффективности работы системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ» на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Научно-техническое и социально-экономическое развитие транспорта и промышленности стран АТР» (г. Хабаровск, 20–23 апреля 2021 г., ДВГУПС).

2. Дипломом II степени за научный доклад на тему «Повышение качества взаимодействия систем внешнего и тягового электроснабжения ДВЖД» на XXIV Краевом конкурсе молодых ученых (г. Хабаровск, 13 января 2022 г., ТОГУ).

Публикации.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 12 печатных работах, в том числе в одной статье в журнале, входящем в международную систему цитирования Scopus, шести – в журналах перечня ВАК РФ (из них 2 – в рецензируемых журналах по научной специальности 2.9.3 Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация) и пяти статьях в журналах и изданиях, входящих в национальную библиографическую базу данных РИНЦ. По результатам работы получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка источников, включающего 111 наименований, 1 приложения и содержит 138 страниц текста, 39 рисунков и 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, приведена краткая характеристика результатов работы.

В главе 1 выполнен анализ существующего состояния и перспективных условий функционирования систем тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ на примере СТЭ ДВЖД, а также известных в настоящее время способов и средств, направленных на выполнение графика движения поездов с минимальными потерями электроэнергии, определены их достоинства и недостатки.

СТЭ переменного тока 25 кВ взаимодействует с СВЭ в целях энергообеспечения графика движения поездов. Токи однофазных тяговых нагрузок ЭПС распределяются несимметрично в узлах фаз присоединения тяговых подстанций к ЛЭП СВЭ (далее – токи узлов), что повышает потери напряжения, мощности и электроэнергии при передаче ее от электростанций СВЭ до ЭПС.

Напряжения в узлах присоединения тяговых подстанций к ЛЭП зависят от токовых нагрузок ЭПС, значений входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП и других факторов. Входные и взаимные сопротивления узлов зависят от топологии и сопротивлений ветвей СВЭ в интервалах времени и влияют на распределение токов ЭПС по плечам питания тяговых подстанций, фазам ЛЭП СВЭ и потери напряжения, мощности и электроэнергии от нагрузок ЭПС соответственно.

В настоящее время в СТЭ переменного тока 25 кВ регулирование напряжения выполняется, как правило, посредством «реактивного управления». При несоответствии уровня напряжения на токоприемниках ЭПС нормативному энергодиспетчер организует выполнение мероприятий, направленных на обеспечение нормируемого уровня напряжения на токоприемниках ЭПС.

Методики расчетов показателей работы СТЭ с учетом значений входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП представлены в работах профессоров Марквардта Г.Г., Германа Л.А. и других ученых и специалистов в области электрифицированных железных дорог. Результаты исследований показывают, что неучет действительных значений входных и взаимных сопротивлений может вносить существенную погрешность при определении показателей работы СТЭ (при расчете уравнивающего тока – 15–50%, при расчете напряжений – 3–15%, потерь мощности – 5–20%, токов короткого замыкания – до 50%). Учет действительных значений входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП повышает точность прогноза распределения токов тяговых нагрузок ЭПС в системах внешнего и тягового электроснабжения и результатов анализа мгновенных и интегральных показателей взаимодействия систем и синтеза рациональных схем питания тяговых нагрузок в интервалах времени движения поездов.

СВЭ, питающая нагрузки ЭПС в СТЭ ДВЖД, включает в себя энергосистемы Амурской области, ЕАО, Хабаровского и Приморского края. СТЭ ДВЖД выполнена по системе однофазного переменного тока 25 кВ и содержит 32 тяговых подстанции, присоединенные к ЛЭП напряжением 110 или 220 кВ.

По результатам анализа взаимодействия СВЭ и СТЭ ДВЖД установлено, что четыре тяговые подстанции, подключенные к тяговой сети по «подпитывающей» схе-

ме (одна фаза ЛЭП питает левое и правое плечи тяговой подстанции), создают «узкое место» для выполнения задач стратегических программ на ДВЖД.

Действующая схема присоединения подстанций участка Ласточка – Сибирцево с подпитывающими подстанциями Ласточка, Дальнереченск, Шмаковка и Спасск-Дальний представлена на рисунке 1.

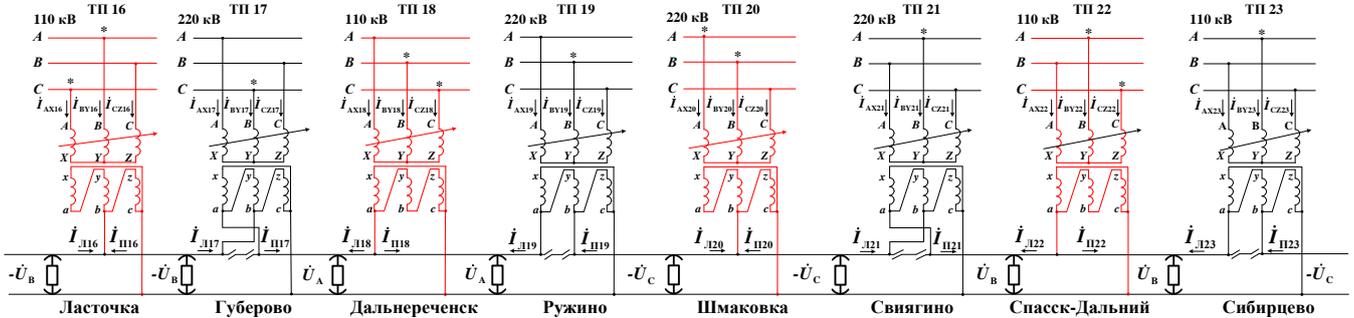


Рис. 1. Действующая схема присоединения тяговых подстанций участка ДВЖД к фазам ЛЭП и тяговой сети

Ранее принятая в эксплуатацию протяженность межподстанционных зон участка ДВЖД Бикин – Сибирцево составляла от 76 до 95,7 км и в последнее время привела к ограничению пропускной способности вследствие высоких потерь напряжения в тяговой сети. В целях повышения напряжения на токоприемниках ЭПС участок тяговой сети Бикин – Сибирцево усилен строительством 4 подпитывающих подстанций, что составляет 13% общего количества тяговых подстанций ДВЖД.

Анализ показателей работы подпитывающих подстанций приведен на примере тяговой подстанции Спасск-Дальний. Действующая схема присоединения подстанции к ЛЭП и тяговой сети представлена на рисунке 2.

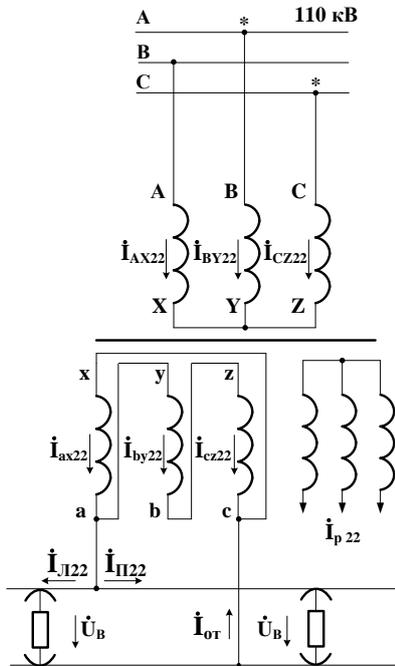


Рис. 2. Действующая схема присоединения тяговой подстанции Спасск-Дальний к ЛЭП и тяговой сети

Токи обмоток тягового трансформатора в фазных координатах, приведенные к тяговому напряжению, рассчитываются по формулам (1)–(3)

$$i_{AX22} = \frac{2}{3}(I_{Л22} e^{i(240-\varphi_{Л22})} + I_{П22} e^{i(240-\varphi_{П22})}); \quad (1)$$

$$i_{BY22} = -\frac{1}{3}(I_{Л22} e^{i(240-\varphi_{Л22})} + I_{П22} e^{i(240-\varphi_{П22})}); \quad (2)$$

$$i_{CZ22} = -\frac{1}{3}(I_{Л22} e^{i(240-\varphi_{Л22})} + I_{П22} e^{i(240-\varphi_{П22})}), \quad (3)$$

где $I_{Л22}, I_{П22}$ – модули токов левого и правого плеч, А;

$\varphi_{Л22}, \varphi_{П22}$ – аргументы токов левого и правого плеч, определенные относительно питающего напряжения

Модули токов фаз А, В и С ЛЭП определяются токами обмоток высшего напряжения (ВН) трансформатора. Расчет токов обмоток выполнен для характерных для перспективных размеров движения ЭПС значений векторов токов левого и правого

плеч подстанции с фазовым сдвигом относительно питающего напряжения 500 А и -37 град. эл. Комплексные токи обмоток тягового трансформатора составляют $\dot{I}_{AX22} = 667e^{i(-157)}$ А, $\dot{I}_{BY22} = 334e^{i23}$ А, $\dot{I}_{CZ22} = 334e^{i23}$ А. Значение коэффициента несимметрии токов фаз СВЭ α_1 высокое и составляет 1. Высоконесимметричные токи фаз ЛЭП от токов ЭПС создают высокую несимметрию падений напряжения на входных сопротивлениях узлов присоединения подстанций к ЛЭП, повышают несимметрию напряжения в СВЭ, потери напряжения, мощности в стали и меди тяговых трансформаторов и электрической энергии.

Принятая схема присоединения приводит к высокой несимметрии токов в обмотках тягового трансформатора и фазах ЛЭП СВЭ. Расчетное значение коэффициента несимметрии падений напряжения по обратной последовательности ΔK_{U2} составляет 1,4%.

Высоконесимметричные токи обмоток тягового трансформатора, трансформаторов и автотрансформаторов подстанций и проводников фаз ЛЭП от токов нагрузок ЭПС, увеличивают потери напряжения, мощности и электроэнергии в электрических сетях СВЭ.

В работе выполнен анализ дополнительных потерь электроэнергии от уравнительных токов в системе тягового электроснабжения ДВЖД. В качестве расчетной принята межподстанционная зона Свиягино – Спасск-Дальний.

Токи обмоток АХ тяговых трансформаторов подстанций Свиягино \dot{I}_{AX21} и Спасск-Дальний \dot{I}_{AX22} составляют $\dot{I}_{AX21} = 441e^{i(-137)}$ А и $\dot{I}_{AX22} = 667e^{i(-157)}$ А. Токи обмоток, питающих межподстанционную зону, создают разные векторы падений напряжения на входных сопротивлениях узлов присоединения подстанций к фазам ЛЭП и сопротивлениях обмоток трансформаторов $\Delta \dot{U}_{П21}$ и $\Delta \dot{U}_{Л22}$. В расчетном примере модуль разности падений напряжения на входных сопротивлениях СВЭ и обмотках тяговых трансформаторов смежных подстанций составляет $\Delta U = 4074$ В.

Неравенство векторов падений напряжения до тяговых шин приводит к возникновению уравнительного тока в СТЭ ДВЖД, что вызывает дополнительные потери электроэнергии в тяговой сети.

Дальнейшая эксплуатация подпитывающих подстанций в СТЭ ДВЖД является «узким местом» выполнения задач, сформулированных программами стратегического развития железных дорог.

В главе 2 обеспечение нормативного уровня напряжения на токоприемниках ЭПС с минимальными потерями электроэнергии в СТЭ переменного тока 25 кВ предложено выполнить встречным интервальным регулированием показателей взаимодействия СВЭ и СТЭ применением информационного моделирования взаимодействия систем.

Повышение достоверности анализа показателей взаимодействия СВЭ и СТЭ при встречном интервальном регулировании показателей работы систем в диссертационной работе выполнено повышением точности математической модели определения мгновенных и интегральных токов плеч тяговых подстанций.

Состояние СВЭ и СТЭ при распределении токов ЭПС в интервалах времени учтено временными (от временный – непостоянный, бывающий или действующий в течение некоторого времени) входными сопротивлениями узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП, комплексными обмоток тяговых трансформаторов с уче-

том количества трансформаторов подстанций в работе, ступеней РПН и сопротивлениями тяговой сети от подстанций до ЭПС.

Оценка повышения достоверности определения нагрузок обмоток тяговых трансформаторов при расчете мгновенных значений токов плеч тяговых подстанций выполнена на примере участка ДВЖД ТП1 – ТП2 (см. рисунок 3).

Сопротивления обмоток генераторов электростанций, ЛЭП и трансформаторов электрических сетей относительно узлов присоединения ТП1 и ТП2 к ЛЭП определены входными сопротивлениями Z_{BX1} и Z_{BX2} .

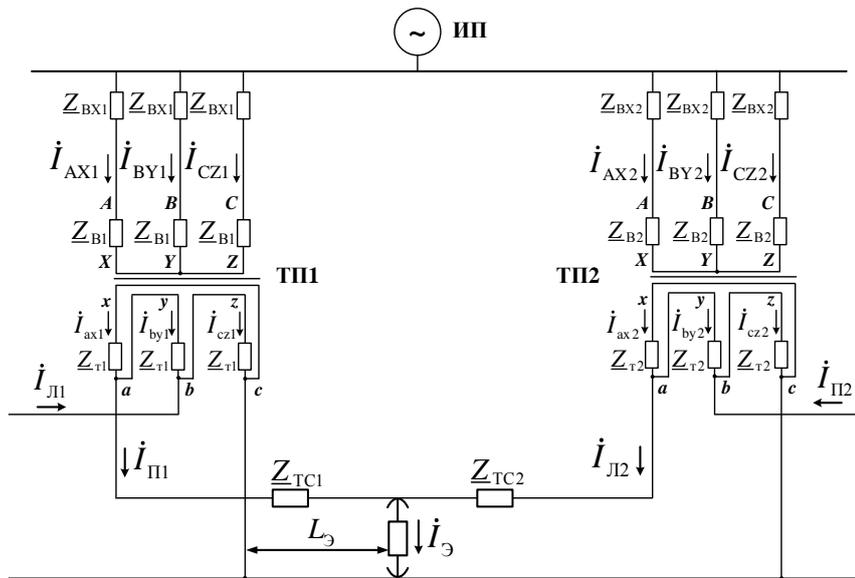


Рис. 3. Расчетная схема определения плеч тяговых подстанций ТП1 и ТП2 от тока нагрузки ЭПС во времени мгновенной схемы

Сопротивления обмоток высшего и тягового напряжения тяговых трансформаторов подстанций ТП1 и ТП2 с учетом количества трансформаторов в работе и действительных коэффициентов трансформации определены сопротивлениями Z_{B1} , Z_{T1} , Z_{B2} , Z_{T2} , и приведены к тяговому напряжению. Сопротивления участков тяговой сети от тяговых шин ТП1 и ТП2 до токоприемника ЭПС Z_{TC1} , Z_{TC2} определены по общим правилам электротехники.

Однофазная тяговая нагрузка ЭПС определена током нагрузки $\dot{I}_Э$. Значение вектора тока ЭПС $\dot{I}_Э$ определено относительно питающего напряжения.

Токи плеч подстанций ТП1 и ТП2 для схемы, представленной на рис. 4 при расчете по известной методике определяются по формулам (4), (5)

$$\dot{I}_{П1} = \frac{L - L_Э}{L} \dot{I}_Э \quad (4)$$

$$\dot{I}_{Л2} = \frac{L_Э}{L} \dot{I}_Э \quad (5)$$

где L – протяженность межподстанционной зоны; $L_Э$ – расстояние от ТП1 до ЭПС.

Токи плеч ТП1 и ТП2 мгновенной схемы при расчете по новой методике определены распределением тока ЭПС по плечам подстанций по формулам (6), (7)

$$\dot{I}_{П1} = \dot{I}_Э \cdot k_P \quad (6)$$

$$\dot{I}_{Л2} = \dot{I}_Э \cdot (1 - k_P) \quad (7)$$

где k_P – коэффициент распределения тока ЭПС (8)

$$k_P = \frac{\frac{2}{3} \cdot (Z_{BX2} + Z_{B2} + Z_{T2}) + Z_{TC2}}{\frac{2}{3} \cdot (Z_{BX1} + Z_{BX2} + Z_{B1} + Z_{T1} + Z_{B2} + Z_{T2}) + Z_{TC1} + Z_{TC2}} \quad (8)$$

Результаты расчетов модулей и аргументов токов плеч по формулам (4) и (5) при различных координатах ЭПС при токе $\dot{I}_Э = 400e^{-i37}$ А показывают линейное изменение модулей токов левого и правого плеч подстанций от 0 до 400 А при неизменных значениях аргументов токов -37 град. эл.

Модули и аргументы токов плеч тяговых подстанций ТП1 и ТП2 при расчете по новой методике определены по формулам (6)-(8). Результаты расчетов представлены на рисунке 4. Полученные результаты показывают изменение как модулей, так и аргументов токов плеч при движении ЭПС. Расчет токов плеч выполняется с учетом действительных падений напряжения на сопротивлениях обмоток тяговых трансформаторов и входных сопротивлений узлов присоединения подстанций к ЛЭП от нагрузок ЭПС.

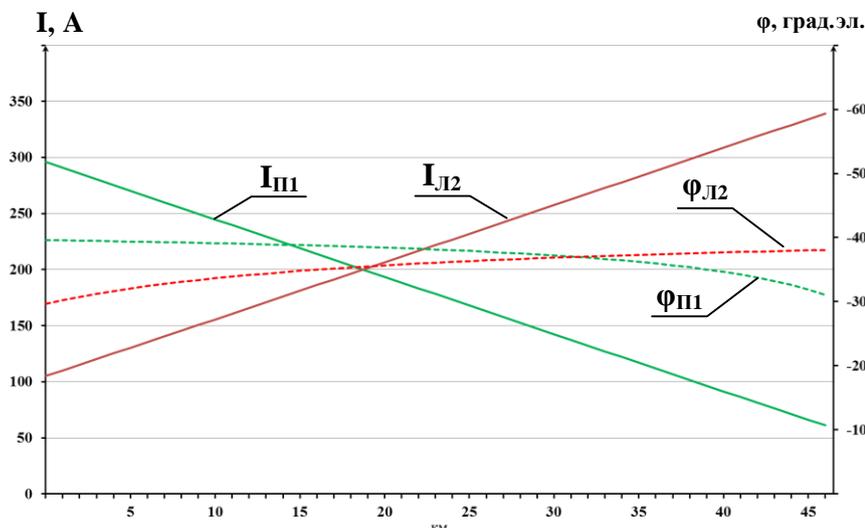


Рис. 4. Модули и аргументы токов левого и правого плеч ТП1 и ТП2

В расчетном примере повышение точности определения токов плеч при перемещении ЭПС в пределах межподстанционной зоны составило, в среднем, для модулей – 30%, для аргументов – 5%.

В целях повышения точности результатов расчетов и нормализации показателей взаимодействия систем электроснабжения ДВЖД в диссертационной работе рассмотрен вопрос

определения действительных в интервалах времени (временных) значений входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП.

Временные входные и взаимные сопротивления узлов присоединения тяговых подстанций i и j к ЛЭП в интервале времени t $Z_{B_{ij}}(t)$, зависят от положений коммутационных аппаратов распределительных устройств подстанции ($КА_i$), выбранных ступеней устройств РПН и количества включенных в работу силовых трансформаторов и автотрансформаторов подстанций ($n_{рпн_i}$, $N_{тр_i}$), количества ЛЭП в работе ($N_{лэп}$), температуры проводов ЛЭП ($t_{лэп_i}$) определим функционалом (9):

$$Z_{B_{ij}}(t) = f(КА_i, n_{рпн_i}, N_{тр_i}, N_{лэп}, t_{лэп_i}, t), \quad (9)$$

В диссертационной работе разработана база данных сопротивлений электрических сетей СВЭ, питающей СТЭ ДВЖД. Общепринятая практика организации баз данных в СВЭ предусматривает применение программ Microsoft Office. Таблицы базы данных созданы в MS Excel и состоят из записей, содержащих информацию о конкретном объекте (порядковый номер звена ЛЭП, класс напряжения, тип провода и др.).

Принятая схема электрических сетей СВЭ, питающей СТЭ ДВЖД, содержит звеньев ЛЭП 110 кВ – 326 ед., 220 кВ – 93 ед., 500 кВ – 6 ед., силовые трансформаторы и автотрансформаторы подстанций 110 кВ – 182 ед., 220 кВ – 41 ед., 500 кВ – 5 ед., а также трансформаторное оборудование 13 электростанций. Схема замещения СВЭ составлена по общим правилам и содержит 360 узлов и 452 ветви.

В целях определения значений временных входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП СВЭ, питающей нагрузки ЭПС в СТЭ ДВЖД, определены матрица соединений M , матрица комплексных сопротивлений ветвей Z_b и матрица входных и взаимных узлов Z_y .

Матрица M характеризует топологию электрических сетей и имеет размерность

359x452. Матрица Z_B содержит значения сопротивлений ветвей СВЭ и имеет размерность 452x452. Матрица Z_Y содержит значения входных и взаимных узлов присоединения тяговых подстанций ДВЖД к фазам ЛЭП и имеет размерность 359x359.

Содержание таблиц базы данных согласовано со специалистами СВЭ и размещено в архиве базы данных для СТЭ. Библиотека архива базы данных выполнена книгой MS Excel формата «.xls», на листах которой размещены таблицы.

Таблицы базы данных содержат информацию о схеме СВЭ, питающей СТЭ ДВЖД, принятой в качестве базовой схемы, критерии которой определены следующим образом: положение коммутационных аппаратов распределительных устройств подстанций – включено, температура проводов ЛЭП и обмоток трансформаторов +20 °С, ступени РПН трансформаторов и автотрансформаторов – 0.

Разработанная база данных СВЭ содержит таблицы паспортных данных проводов ЛЭП [$A_{пр(Б)}$], силовых трансформаторов и автотрансформаторов [$A_{тр(Б)}$] и значений среднегеометрических расстояний между проводами фаз ЛЭП [$A_{ср(Б)}$], таблицы звеньев ЛЭП и подстанций [$A_{лэп(Б)}$] и [$A_{пст(Б)}$], таблицы состояния звеньев ЛЭП, трансформаторов и автотрансформаторов подстанций и электростанций [$A_{л(Б)}$] и [$A_{стр(Б)}$], таблицы сопротивлений звеньев ЛЭП [$Z_{лэп(Б)}$], силовых трансформаторов и автотрансформаторов [$Z_{стр(Б)}$] и сопротивлений ветвей [$Z_{свэ(Б)}$], матрицу значений входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП базовой схемы $Z_Y(Б)$.

Таблица [$A_{пр(Б)}$] содержит данные 64 типов проводов, эксплуатируемых в электрических сетях СВЭ. Таблица [$A_{тр(Б)}$] содержит паспортные данные 44 типов трансформаторов и 6 типов автотрансформаторов, эксплуатируемых на трансформаторных подстанциях и электростанциях СВЭ.

Таблица [$A_{ср(Б)}$] содержит информацию о среднегеометрических расстояниях между проводами фаз ЛЭП ($D_{ср}$) в зависимости от класса напряжения линии ($U_{л}$).

Таблица [$A_{лэп(Б)}$] содержит данные 425, в том числе 359 одноцепных и 66 двухцепных звеньев ЛЭП СВЭ и имеет размерность 520x8 (10)

$$[A_{лэп(Б)}] = f(j, n_j, k_j, U_{лj}, l_{лэпj}, q_j, T_{прj,q}, n_{фj}), \quad (10)$$

где j – порядковый номер звена ЛЭП, $j=1, \dots, 425$; n_j, k_j – номера начального и конечного узлов j -го звена ЛЭП; $U_{лj}$ – класс напряжения j -го звена ЛЭП; $T_{прj}$ – тип провода j -го звена ЛЭП; $l_{лэпj}$ – протяженность j -го звена ЛЭП; q_j – количество цепей в j -м звене ЛЭП; $n_{фj}$ – количество проводов в фазе j -го звена ЛЭП.

Таблица [$A_{пст(Б)}$] базовой схемы СВЭ содержит данные 73 автотрансформаторов и 419 трансформаторов, эксплуатируемых на 228 подстанциях и 13 электростанциях и имеет размерность 492x4 (11)

$$[A_{пст(Б)}] = f(i, q, q_i, T_{три,q}), \quad (11)$$

где i – порядковый номер подстанции (электростанции), $i=1, \dots, 241$; q – порядковый номер трансформатора (автотрансформатора), $q=1, \dots, q_i$; q_i – количество трансформаторов i -й подстанции; $T_{три,q}$ – тип q -го трансформатора i -й подстанции, $q=1, \dots, q_i$;

Для базовой схемы СВЭ, питающей нагрузки ЭПС в СТЭ ДВЖД, таблицы [$A_{л(Б)}$] и [$A_{стр(Б)}$] имеют размерность 425x4 и 452x5 и структуру (12), (13)

$$[A_{л(Б)}] = f(j, t_{лэпj}, C_{лj}, t_{лэпj}), \quad (12)$$

$$[A_{стр(Б)}] = f(i, q, n_{рпнi,q}, t_{три,q}, C_{три,q}), \quad (13)$$

где $C_{лj}$ – состояние j -го звена ЛЭП, (1 – включено, 0 – отключено); $t_{лэпj}$ – температура j -го звена ЛЭП. $C_{три,q}$ – состояние q -го трансформатора i -й подстанции (электростанции)

(1 – включен, 0 – отключен); $n_{рпнi,q}$ – степень РПН q-го трансформатора i-й подстанции; $t_{трi,q}$ – температура обмоток q-го трансформатора i-й подстанции.

Комплексные сопротивления ЛЭП, обмоток силовых трансформаторов и автотрансформаторов подстанций и сопротивления ветвей СВЭ базовой схемы определены в документе MS Excel и сведены в электронные таблицы $[Z_{лэп(б)}]$, $[Z_{стр(б)}]$ и $[Z_{свэ(б)}]$.

Таблица $[Z_{лэп(б)}]$ имеет размерность 425x5 и структуру (14)

$$[Z_{лэп(б)}] = (j, n_j, k_j, R_j, X_j), \quad (14)$$

где R_j, X_j – активное и индуктивное сопротивления j-го звена ЛЭП.

Для базовой схемы СВЭ, питающей нагрузки ЭПС в СТЭ ДВЖД, таблица $[Z_{стр(б)}]$ имеет размерность 241x7 и структуру (15)

$$[Z_{стр(б)}] = (i, R_{вi}, R_{сi}, R_{нi}, X_{вi}, X_{сi}, X_{нi}), \quad (15)$$

где $R_{вi}, R_{сi}, R_{нi}$ – активные сопротивления обмоток трансформаторов и автотрансформаторов i-й подстанции (электростанции); $X_{вi}, X_{сi}, X_{нi}$ – индуктивные сопротивления обмоток трансформаторов и автотрансформаторов i-й подстанции.

Таблица $[Z_{свэ(б)}]$ имеет размерность 452x5 и структуру (16)

$$[Z_{свэ(б)}] = (j, n_j, k_j, R_{вj}, X_{вj}), \quad (16)$$

где $R_{вj}, X_{вj}$ – активное и реактивное сопротивление j-й ветви, $j=1, \dots, 452$.

Временное отключение коммутационных аппаратов РУ подстанций может приводить к изменению топологии СВЭ, принятой в базе данных, вследствие отключения ветвей (цепи ЛЭП, силовые трансформаторы или автотрансформаторы подстанций).

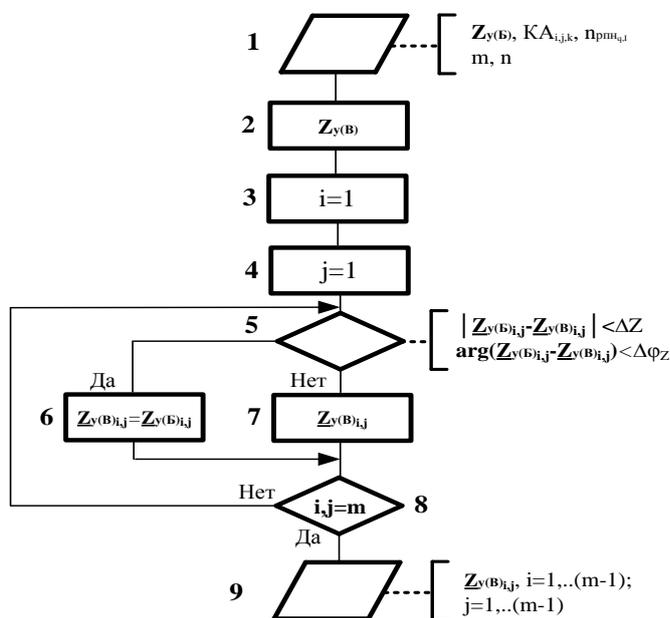
Плановые изменения ступеней устройств регулирования напряжения и отключение коммутационных аппаратов в СВЭ, организованное диспетчерами энергодиспетчерских центров субъектов электроэнергетики (сетевые организации, генерирующие компании и др.) выполняется в соответствии с графиком регулирования напряжения в предварительно определенные даты, часы и минуты. Информация о прогнозируемом отключении коммутационных аппаратов распределительных устройств подстанций и электростанций СВЭ и время их переключения могут быть определены с высокой точностью и переданы в СТЭ в целях актуализации исходных данных расчета входных и взаимных сопротивлений с синхронизацией по астрономическому времени прогнозного графика движения поездов.

В целях учета временной топологии и сопротивлений ветвей расчет временных входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП СУБД в MS Access предусмотрены таблицы $[A_{лэп(в)}]$, $[A_{пр(в)}]$, $[A_{ср(в)}]$, $[A_{пст(в)}]$, $[A_{тр(в)}]$, $[A_{л(в)}]$, $[A_{стр(в)}]$, $[Z_{лэп(в)}]$, $[Z_{стр(в)}]$, $[Z_{свэ(в)}]$. Структура таблиц СУБД соответствует (10)-(16). Организация связей между таблицами в СУБД исполнена по ключевым полям, что позволяет использовать связанные данные разных таблиц.

Временную топологию СВЭ в диссертационной работе предлагается учитывать принятием временных значений сопротивлений ветвей порядка 1 МОм, в случае, если временные отключения коммутационных аппаратов приводят к отключению ЛЭП, трансформаторов и автотрансформаторов в ветвях СВЭ.

Принятие временных сопротивлений ветвей по предложенной методике приводит к погрешности определения модулей и аргументов входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП не более 0,01%, что подтверждает адекватность предложенного способа учета временной топологии сопротивлениями ветвей.

СУБД реляционной базой данных выполнено в виде двумерных связанных таблиц, разработанных в MS Access. Расчет матрицы значений временных входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП $Z_y(\mathbf{v})$ выполняется в MATLAB с учетом временной топологии и временных сопротивлений ветвей. Матрица $Z_y(\mathbf{v})$ сохраняется в базе данных с указанием даты и времени начала и окончания расчетных временных топологии и сопротивлений ветвей.



В целях определения временных значений входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП разработано автоматизированное рабочее место (АРМ РВВС). Программное обеспечение АРМ предусматривает MS Access, MS Excel и MATLAB. Расчет временных значений входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП на АРМ выполняется в соответствии с разработанным алгоритмом. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 5, содержание блоков – в таблице 1.

Рис. 5. Блок-схема алгоритма определения значений временных входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП СВЭ

Таблица 1 – Содержание блоков алгоритма

Номер блока	Содержание
1	Ввод исходных данных
2	Определение матрицы временных значений входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП
3, 4	Выбор первых строки и столбца матрицы временных значений входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП
5	Проверка соответствия разности базового и временного значений входного ($i=j$) и взаимного ($i \neq j$) сопротивлений узлов предельно допустимому отклонению модуля и аргумента относительно базового значения
6, 7	Определение значений временных входного ($i=j$) и взаимного ($i \neq j$) сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП
8	Проверка рассмотрения всех строк и столбцов матрицы временных значений входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП
9	Вывод результатов расчета

Значения ΔZ и $\Delta \varphi_Z$ определяются для узлов в целях формирования базы данных по оценке влияния отключения коммутационного аппарата, изменения ступени регулирования напряжения и температуры проводов ЛЭП и обмоток трансформаторов на основании опыта эксплуатации.

Матрицы временных сопротивлений ветвей и входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП хранятся в архиве базы данных с

указанием числа, месяца, года, времени начала и окончания временных топологии и сопротивлений ветвей.

Детерминированная последовательность прогнозных мгновенных токов плеч расчетного периода T , количество которых зависит от времени мгновенной схемы Δt , при информационном моделировании может быть определена в интервалы времени. Снижение дисперсии интегральных показателей расчетного периода выполняется повышением количества интервалов времени в расчетном периоде при минимизации дисперсии в каждом интервале.

Коммутационные аппараты и устройства регулирования напряжения в СТЭ имеют ограниченный ресурс и в том числе в расчетном периоде. Рациональное количество интервалов времени по условию расхода ресурса устройств регулирования напряжения и коммутационных аппаратов тяговых подстанций могут ограничивать число интервалов расчетного периода.

В целях обеспечения рационального расхода ресурса коммутационных аппаратов и устройств регулирования напряжения при снижении дисперсии при определении интегральных показателей взаимодействия СТЭ и СВЭ разработан алгоритм расчета рационального количества интервалов времени в расчетном (суточном) периоде.

Нормализация количества прогнозных интервалов времени выполняется распределением мгновенных схем интервала с порядковым номером i минимальной продолжительности i_{\min} в смежный или смежные интервалы, расположенные слева $i_{\min}-1$ и (или) справа $i_{\min}+1$. Критерием целесообразности нормализации количества интервалов времени является невыполнение соотношения (17)

$$n_{\pi} - n_p < \Delta n, \quad (17)$$

где n_{π} , n_p – количество интервалов времени в принятом приближении и рациональное количество интервалов; Δn – предельно допустимое отклонение количества интервалов времени мгновенных схем показателя работы СТЭ от рационального.

Определение интервала времени i_{\min} в прогнозном расчетном периоде выполняется путем последовательного перебора интервалов порядковых номеров от 1 до n . С этой целью интервал $i=1$ принимается в качестве базового интервала с условно наименьшим количеством мгновенных схем. Количество мгновенных схем интервала 1 принимается в качестве условно минимального m_{\min} и определяется по формуле (18)

$$m_{\min} = K_1 - H_1 + 1. \quad (18)$$

Далее выполняется переход к следующему интервалу $i+1$ и определение количества мгновенных схем в интервале $i+1$. Критерий выбора порядкового номера интервала i_{\min} определяется по условию (19)

$$m_i < m_{\min}. \quad (19)$$

Поиск интервала i_{\min} выполняется в цикле методом полного перебора, что гарантирует определение интервала минимальной продолжительности на каждом этапе нормализации. Начало интервала i_{\min} соответствует порядковому номеру мгновенной схемы H_i . Нормализация интервала i выполняется распределением мгновенных схем интервала от H_i до K_i .

Проверка дисперсии интервалов выполняется для всех мгновенных схем в интервалах. Изменение состава мгновенных схем в интервале (или интервалах) приводит к изменению числа интервалов, порядковых номеров мгновенных схем начала и

окончания интервалов. Критерий выбора k -го варианта нормализации числа и состава мгновенных схем в интервале имеет вид (20)

$$D_k \rightarrow \min, \quad (20)$$

где D_k – суммарная дисперсия значений мгновенных схем расчетного показателя в нормализованных интервалах в k -м варианте нормализации.

Итерационный процесс нормализации количества интервалов времени в расчетном периоде продолжается до соответствия рациональному числу интервалов с учетом предельно допустимого отклонения Δn . Полученные интервалы времени используются для выбора рациональных схем питания тяговых нагрузок, обеспечивающие целевые интегральные значения показателей работы СТЭ.

Анализ качества выбранных схем питания тяговых нагрузок выполняется сравнением прогнозных и исполненных значений интегральных показателей работы СТЭ. Расчет количества интервалов для выбора рациональных схем питания прогнозных тяговых нагрузок предложено выполнять на разработанной компьютерной программе. Новизна программы подтверждена свидетельством о регистрации программы для ЭВМ.

В главе 3 в целях выполнения отдельных задач, сформулированных в программах стратегического развития железных дорог, рассмотрен вопрос повышения эффективности взаимодействия систем электроснабжения нормализацией схемы присоединения тяговых подстанций участка ДВЖД Ласточка - Сибирцево к тяговой сети и ЛЭП.

Новая схема присоединения тяговых подстанций участка СТЭ ДВЖД Ласточка – Сибирцево к фазам ЛЭП и тяговой сети представлена на рисунке 6.

Нормализация схем присоединения тяговых подстанций участка тяговой сети ДВЖД обеспечивает снижение потерь напряжения, мощности и электрической энергии за счет рационального распределения токов ЭПС по плечам подстанций.

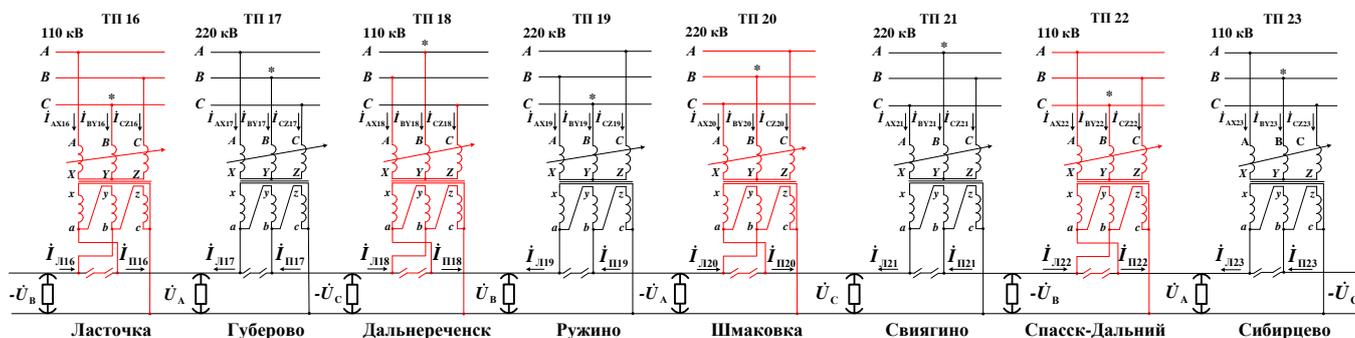


Рис. 6. Новые схемы присоединения тяговых подстанций участка ДВЖД к фазам ЛЭП и тяговой сети

Новые схемы присоединения 4 тяговых подстанций предусматривают электроснабжение ЭПС плеч подстанций от тяговых обмоток «ax» и «cz» трансформаторов, что приводит к распределению токов тяговых нагрузок ЭПС в обмотках тяговых трансформаторов и фазах ЛЭП в соотношении 2/3 и -1/3. Новые схемы присоединения подстанций участка Ласточка – Сибирцево предусматривает чередование присоединения наименее нагруженных обмоток тяговых трансформаторов подстанций к фазам ЛЭП.

Нормализация схем присоединения 4 тяговых подстанций предусматривает изменение схем присоединения 8 тяговых подстанций участка Ласточка – Сибирцево в целях обеспечения двухстороннего питания тяговой сети. При этом на других тяго-

вых подстанциях СТЭ ДВЖД схемы присоединения подстанций к тяговой сети и фазам ЛЭП сохраняются неизменными.

Анализ повышения показателей работы подпитывающих тяговых подстанций переходом к новым схемам присоединения подстанций к фазам ЛЭП и тяговой сети выполнен на примере подстанции Спасск-Дальний (рисунок 7).

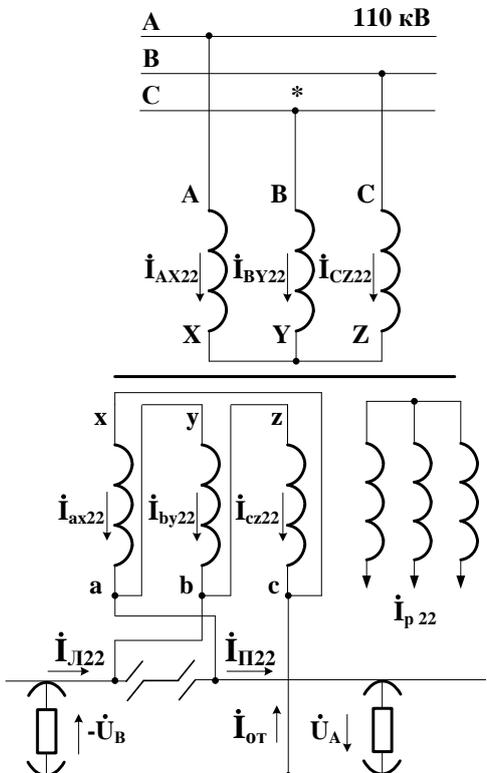


Рис. 7. Новая схема присоединения тяговой подстанции Спасск-Дальний к ЛЭП и тяговой сети

Токи обмоток ВН тягового трансформатора подстанции Спасск-Дальний в фазных координатах, приведенные к тяговому напряжению, при новой схеме присоединения подстанции (21)-(23)

$$\dot{I}_{AX22} = \frac{1}{3}(-I_{Л22} e^{i(240-\varphi_{Л22})} + 2I_{П22} \cdot e^{i(-\varphi_{П22})}); \quad (21)$$

$$\dot{I}_{BY22} = -\frac{1}{3}(I_{Л22} e^{i(240-\varphi_{Л22})} + I_{П22} e^{i(-\varphi_{П22})}); \quad (22)$$

$$\dot{I}_{CZ22} = \frac{1}{3}(2I_{Л22} e^{i(240-\varphi_{Л22})} - I_{П22} e^{i(-\varphi_{П22})}). \quad (23)$$

Расчет токов обмоток тягового трансформатора и фаз ЛЭП при новой схеме присоединения подстанции выполнен для значений модулей и аргументов токов левого и правого плеч относительно питающего напряжения $I_{Л22}=I_{П22}= 500$ А и $\varphi_{Л22}=\varphi_{П22}= -37$ град. эл.

При новой схеме присоединения тяговой подстанции токи обмоток AX, BY и CZ составляют $441e^{-i13}$, $167e^{i83}$ и $441e^{-i176}$ А и не превышают номинальный ток обмотки (485 А). Значения коэффициентов α_1 и ΔK_{U2} при новой схеме присоединения

подстанции составляют 0,5 и 0,7%, что в 2 раза ниже, чем при действующей схеме.

Модуль разности падений напряжений до тяговых шин подстанций Свягино и Спасск-Дальний при новой схеме присоединения подстанции к ЛЭП и тяговой сети составляет 2,9 кВ, что на 28% ниже, чем при действующей. Понижение разности напряжений на тяговых шинах уменьшает уравнительный ток и дополнительные потери электроэнергии в тяговой сети межподстанционной зоны.

Для тяговых подстанций Ласточка, Дальнереченск, Шмаковка и Спасск-Дальний разработаны новые схемы РУ высшего, тягового и районного напряжения и схемы нейтральных вставок в сечениях контактной сети.

В главе 4 приведены результаты оценки технико-экономической эффективности нормализации схем присоединения 4 тяговых подстанций участка ДВЖД Ласточка – Сибирцево к ЛЭП и тяговой сети, определен срок окупаемости реконструкции участка.

Сравнительный анализ повышения технических показателей взаимодействия систем электроснабжения ДВЖД выполнен для диапазона изменения модулей токов левого и правого плеч 0–500 А при значениях углов токов относительно питающих напряжений -37 град. эл. Результаты анализа показателей приведены в работе в виде гиперповерхностей.

Модули токов обмоток AX, BY и CZ подстанции \dot{i} в момент времени t , приведенные к тяговому напряжению, зависят от комплексных токов левого и правого плеч

$\dot{I}_{Лi}, \dot{I}_{Пi}$ подстанций и коэффициентов распределения токов плеч $\alpha_{Лi}, \alpha_{Пi}$ в обмотках определяются функционалами (24)-(26)

$$I_{AXi}(t) = f(\dot{I}_{Лi}, \dot{I}_{Пi}, \alpha_{Лi}, \alpha_{Пi}, t); \quad (24)$$

$$I_{BYi}(t) = f(\dot{I}_{Лi}, \dot{I}_{Пi}, \alpha_{Лi}, \alpha_{Пi}, t); \quad (25)$$

$$I_{CZi}(t) = f(\dot{I}_{Лi}, \dot{I}_{Пi}, \alpha_{Лi}, \alpha_{Пi}, t). \quad (26)$$

Гиперповерхности модулей токов обмоток АХ, ВУ, СЗ тягового трансформатора подстанции Спасск-Дальний при действующей схеме присоединения подстанции к ЛЭП и тяговой сети определены по формулам (1)-(3) в диапазоне токов плеч до 500 А и представлены на рисунке 8.

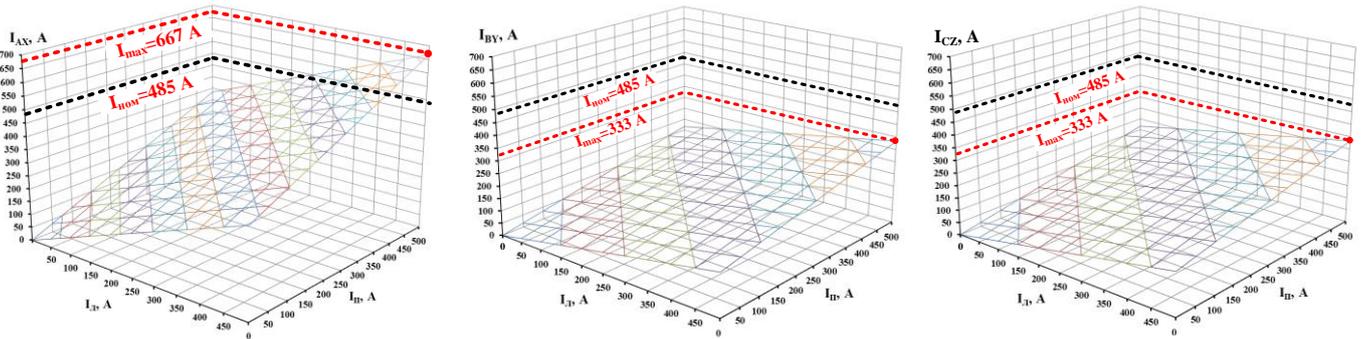


Рис. 8. Гиперповерхности модулей токов обмоток АХ, ВУ, СЗ тягового трансформатора при действующей схеме присоединения подстанции к ЛЭП и тяговой сети

При токах плеч 500 А модули токов обмоток трансформатора составляют 667 А (АХ) и 334 А (ВУ и СЗ). Нагрузка обмотки АХ превышает номинальный ток обмотки на 38%. Обмотки ВУ и СЗ при этом являются недогруженными на 32% относительно номинального тока. Средние значения токов обмоток в принятом диапазоне токов плеч составляют 333,5 А (АХ) и 166,5 А (ВУ и СЗ), эффективные значения токов – 366 А (АХ) и 182 А (ВУ и СЗ).

Гиперповерхности модулей токов обмоток АХ, ВУ, СЗ тягового трансформатора подстанции Спасск-Дальний при новой схеме присоединения к ЛЭП и тяговой сети определены по формулам (21)-(23) и представлены на рисунке 9.

При новой схеме присоединения подстанции модули токов обмоток тягового трансформатора при токах левого и правого плеч 500 А составляют 441 А (АХ и СЗ) и 165 А (ВУ). Модули токов обмоток АХ и СЗ, питающие тяговые нагрузки левого и правого плеч, на 34% ниже, чем при действующей схеме, нагрузка обмоток составляет 91% от номинального тока.

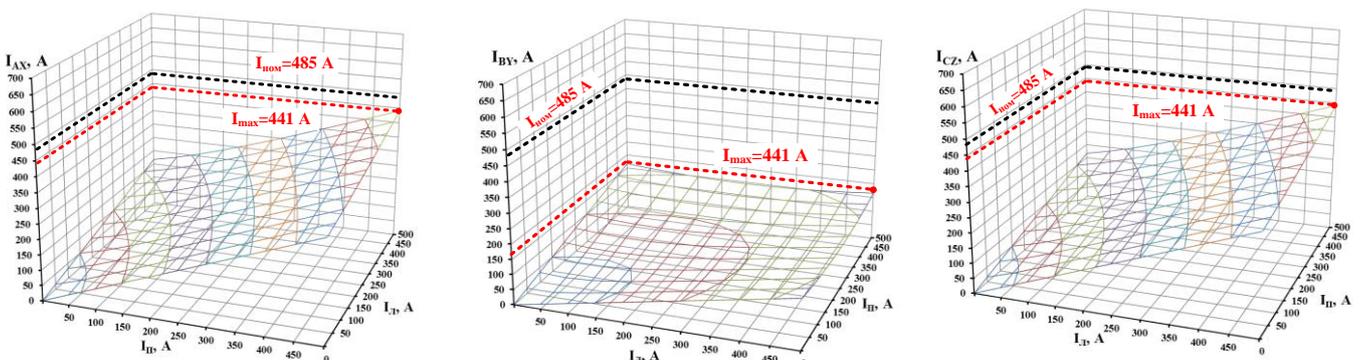


Рис. 9. Гиперповерхности модулей токов обмоток АХ, ВУ, СЗ тягового трансформатора при новой схеме присоединения подстанции к ЛЭП и тяговой сети

Средние значения модулей токов обмоток, питающих тяговые нагрузки (АХ и СZ), составляют 226 А, ВУ – 104 А, что на 32 и 37% ниже, чем при действующей схеме присоединения подстанции, эффективные значения токов – 250 А (АХ и СZ) и 111 А (ВУ), что на 32 и 40% ниже, чем при действующей схеме. Снижение дисперсии токов обмоток составляет 34%.

Оценка продления срока эксплуатации тягового трансформатора при применении новых схем присоединения тяговых подстанций к ЛЭП и тяговой сети в диссертационной работе выполнена для трансформатора подстанции Спасск-Дальний. Расчет температуры наиболее нагретых точек обмоток тягового трансформатора выполнен для наиболее нагруженной обмотки АХ трансформатора по эффективным значениям тока обмотки в диапазоне токов плеч до 500 А.

Нормализация схемы присоединения подстанции обеспечивает снижение максимальной температуры нагрева наиболее нагретой точки обмотки АХ тягового трансформатора на 40% и соответствие температуры наиболее нагретых точек обмоток, питающих тяговые нагрузки левого и правого плеч, нормативным значениям. Снижение интенсивности термического износа изоляции обмотки составляет 8%, что продлевает срок эксплуатации трансформатора на 2 года и понижает расходы на обеспечение перевозочного процесса для ДВЖД на 12 млн. руб. в расчете на 1 тяговый трансформатор.

Потери напряжения до тяговых шин левого $\Delta U_{Лi}(t)$ и правого $\Delta U_{Пi}(t)$ плеч подстанции i в момент времени t зависит от комплексных токов плеч подстанций, схемы присоединения подстанции к ЛЭП и тяговой сети, временных входных сопротивлений $Z_{ВХi}$, сопротивлений обмоток тягового трансформатора $Z_{Вi}, Z_{Тi}$ определяются функционалом (27)

$$\Delta U_{Лi}(t), \Delta U_{Пi}(t) = f(\dot{I}_{Лi}, \dot{I}_{Пi}, \alpha_{Лi}, \alpha_{Пi}, Z_{ВХi}, Z_{Вi}, Z_{Тi}, t). \quad (27)$$

Гиперповерхности потерь напряжения до тяговых шин на входных сопротивлениях и сопротивлениях обмоток трансформаторов тяговой подстанции Спасск-Дальний при действующей схеме присоединения подстанции представлены на рисунках 10(а) (левое плечо) и 10(б) (правое плечо).

При действующей схеме присоединения подстанции Спасск-Дальний потери напряжения до тяговых шин при токах левого и правого плеч 500 А составляют 5,1 кВ.

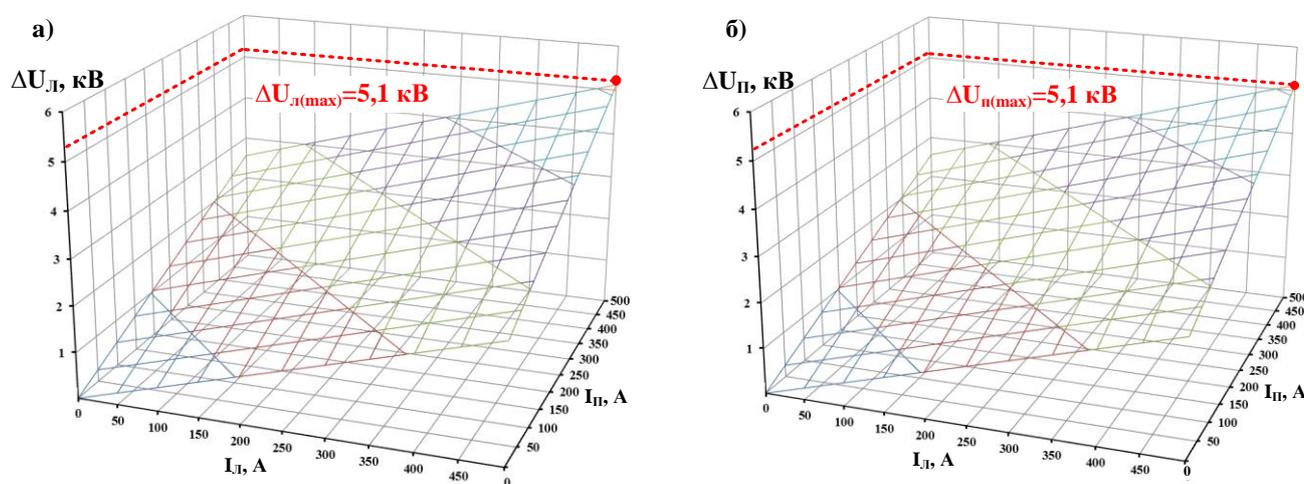


Рис. 10. Гиперповерхности потерь напряжения до тяговых шин левого (а) и правого (б) плеча тяговой подстанции при действующей схеме присоединения к ЛЭП и тяговой сети

Гиперповерхности потерь напряжения до тяговых шин тяговой подстанции Спасск-Дальний при новой схеме присоединения подстанции представлены на рисунках 11(а) (левое плечо) и 11(б) (правое плечо).

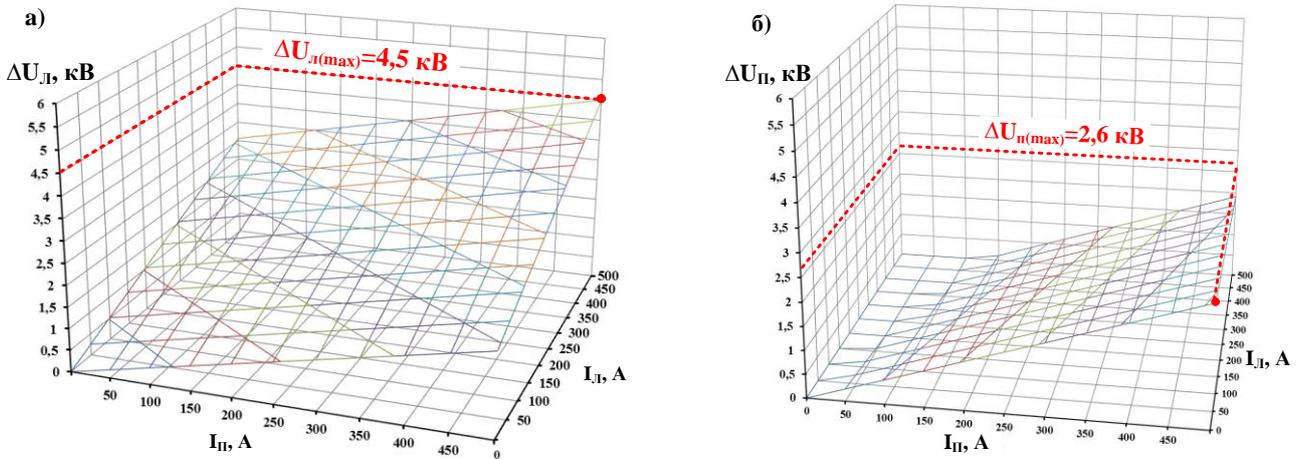


Рис. 11. Гиперповерхности потерь напряжения до тяговых шин левого (а) и правого (б) плеча тяговой подстанции при новой схеме присоединения к ЛЭП и тяговой сети

При новой схеме присоединения потери напряжения до тяговых шин при токах плеч 500 А составляют 4,5 кВ (левое плечо) и 2,6 кВ (правое плечо), что на 12% и 50% ниже, чем при действующей схеме. Снижение потерь напряжения до тяговых шин повышает напряжение на токоприемниках ЭПС.

Значение коэффициента несимметрии токов α_1 обмоток тяговых трансформаторов и фаз ЛЭП при действующей схеме присоединения тяговой подстанции Спасск-Дальний к ЛЭП и тяговой сети равно единице независимо от соотношения токов плеч.

При новой схеме присоединения при равных токах плеч коэффициент α_1 в 2 раза ниже, чем при действующей схеме и равен 0,5. Снижение несимметрии токов узлов фаз ЛЭП от токов тяговых нагрузок понижает потери напряжения, мощности и электроэнергии при передаче ее от электростанций до ЭПС.

Потери в меди тягового трансформатора подстанции i в момент времени t $\Delta P_{Mi}(t)$ зависят от модулей токов обмоток и активных, с учетом температуры, сопротивлений обмоток R_{Bi}, R_{Hi} и определяются функционалом (28)

$$\Delta P_{Mi}(t) = f(I_{AXi}, I_{BYi}, I_{CZi}, R_{Bi}, R_{Hi}, t). \tag{28}$$

Потери в стали тягового трансформатора подстанции i в момент времени t $\Delta P_{CTi}(t)$ зависят от потерь холостого хода трансформатора ΔP_{XXi} , токов плеч и входных сопротивлений узлов присоединения подстанции к ЛЭП и определяются функционалом (29)

$$\Delta P_{CTi}(t) = f(\Delta P_{XXi}, I_{Li}, I_{Pi}, \alpha_{л1}, \alpha_{п1}, Z_{BXi}, t). \tag{29}$$

Гиперповерхности потерь в стали и меди тягового трансформатора подстанции Спасск-Дальний при действующей и новой схеме присоединения подстанции к ЛЭП и тяговой сети представлены на рисунках 12(а) и 12(б).

Потери в стали и меди тягового трансформатора при токах левого и правого плеч 500 А при действующей схеме присоединения подстанции составляют 39 кВт и 188 кВт, при новой схеме – 36 кВт и 117 кВт.

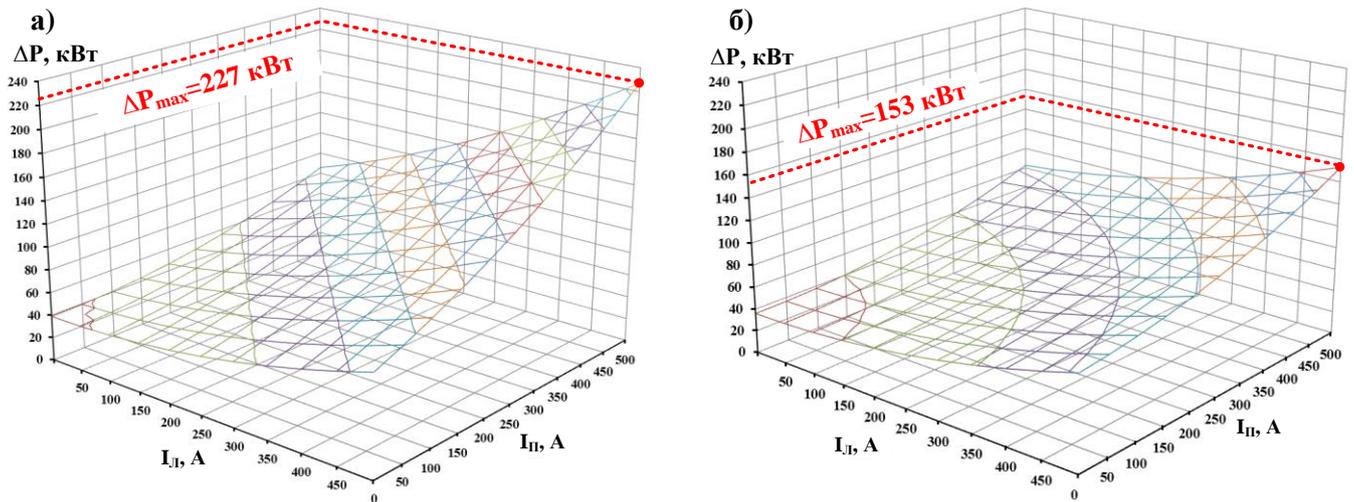


Рис. 12. Гиперповерхности потерь в стали и меди тягового трансформатора при действующей (а) и новой (б) схеме присоединения подстанции к ЛЭП и тяговой сети

Применение новой схемы присоединения тяговой подстанции к ЛЭП и тяговой сети создает снижение потерь в стали и меди тягового трансформатора на 8% и 38% соответственно.

Оценка экономической эффективности нормализации схем присоединения 4 тяговых подстанций участка ДВЖД Ласточка – Сибирцево выполнена по критерию срока окупаемости затрат на реконструкцию участка. Затраты на реконструкцию участка учтены стоимостью сооружения нейтральных вставок в сечениях контактной сети тяговых подстанций Ласточка, Дальнереченск, Шмаковка и Спасск-Дальний.

Результаты оценки экономии текущих расходов для ДВЖД на энергоснабжение ЭПС от снижения экономического ущерба $\Delta C_{ЭК}$ от потерь электроэнергии в тяговых трансформаторах подстанций Ласточка, Дальнереченск, Шмаковка и Спасск-Дальний $\Delta W_{тр}$, электрических сетях СВЭ $\Delta W_{СВЭ}$ и уравнильных токов в тяговой сети $\Delta W_{д}$ представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Снижение экономического ущерба для ДВЖД от нормализации схемы присоединения тяговых подстанций участка Ласточка – Сибирцево к ЛЭП и тяговой сети

	$\Delta W_{тр}$, ГВт·ч/год	$\Delta W_{СВЭ}$, ГВт·ч/год	$\Delta W_{т}$, ГВт·ч/год	$\Delta C_{ЭК}$, млн. руб/год
Действующая схема	3,4	2,6	7,5	51,6
Новая схема	2,8	1,8	3,6	30,4

Затраты на материалы и выполнение строительных и монтажных работ по сооружению нейтральных вставок в ценах 2023 года составляют $Z=65,6$ млн. руб. Эксплуатационные расходы на содержание и обслуживание составляют 1 млн. руб/год.

Нормализация схем присоединения тяговых подстанций участка ДВЖД Ласточка – Сибирцево к ЛЭП и тяговой сети обеспечивает уменьшение потерь электроэнергии на 5,5 ГВт·ч/год (40%) по отношению к действующей схеме, что снижает затраты на энергообеспечение графика движения поездов на 21,2 млн. руб/год. Срок окупаемости реконструкции участка составляет 5 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ показателей взаимодействия систем внешнего и тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ на примере СТЭ ДВЖД. Присоединение тяговых подстанций в СТЭ переменного тока 25 кВ по «подпитывающей» схеме создает «узкое место» повышения веса поездов и снижения интервалов попутного следования.

2. Математическая модель расчета распределения токов тяговых нагрузок ЭПС в обмотках тяговых трансформаторов и фазах ЛЭП системы внешнего электроснабжения уточнена разработанными в диссертационном исследовании временными входными сопротивлениями узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП.

3. Разработаны алгоритм и АРМ определения временных входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП СВЭ.

4. Разработана база данных ЛЭП и силовых трансформаторов и автотрансформаторов подстанций СВЭ, питающей СТЭ ДВЖД.

5. Разработан алгоритм определения количества интервалов времени, выбора схем питания прогнозных тяговых нагрузок в расчетном периоде с учетом минимизации дисперсии и рационального расхода ресурса коммутационных аппаратов и устройств регулирования напряжения тяговых подстанций. Реализация алгоритма выполнена программой для ЭВМ.

6. Выполнена нормализация схем присоединения 13% тяговых подстанций ДВЖД к ЛЭП и тяговой сети. Применение новых схем присоединения подстанций обеспечивает снижение потерь напряжения до тяговых шин, потерь мощности и электроэнергии в тяговых трансформаторах подстанций, тяговой сети и электрических сетях СВЭ на 5,4 ГВт·ч/год и позволяет продлить срок службы трансформаторов 4 тяговых подстанций ДВЖД на 8%.

7. Выполнена экономическая оценка нормализации схемы присоединения тяговых подстанций участка ДВЖД Ласточка – Сибирцево. Применение новых схем присоединения 4 тяговых подстанций к ЛЭП и тяговой сети понижает экономический ущерб от потерь электрической энергии для ДВЖД на 21,2 млн руб./год. Срок окупаемости реконструкции участка составляет 5 лет.

8. Полученные результаты доказывают, что информационное моделирование нормализации схем питания тяговых нагрузок и присоединения тяговых подстанций к ЛЭП и тяговой сети повышает эффективность взаимодействия систем тягового и внешнего электроснабжения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в международную систему цитирования Scopus:

1. An algorithm of calculating the input and mutual resistances of the external electric power supply system / N. P. Grigoriev, V. A. Tikhomirov, P. N. Trofimovich, V. A. Kovalev, I. G. Kopyay // Proceedings II International Scientific Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education (ASEDU-II-2021) : Conference Proceedings, Krasnoyarsk, 28 окт. 2021 г. Vol. 2647 A. – Krasnoyarsk : AIP PUBLISHING, 2021. – P. 60023.

Статьи в журналах и изданиях перечня ВАК Российской Федерации:

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах по научной специальности 2.9.3 Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация:

2. Повышение эффективности работы тяговой подстанции переменного тока / Н. П. Григорьев, А. В. Данилюк, П. Н. Трофимович, В. А. Ковалев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2020. – № 5. – С. 12–17.

3. Повышение работоспособности системы тягового электроснабжения Дальневосточной железной дороги / Н. П. Григорьев, И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, В. А. Ковалев, В. В. Шаталов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – Т. 81, № 3. – С. 248–257.

Статьи в журналах, входящих в национальную библиографическую базу данных РИНЦ

4. Снижение затрат на электрическую энергию для перевозки грузов и пассажиров на ДВЖД / Н.П. Григорьев, А.П. Парфианович, А.В. Воприков, В.А. Ковалев // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона - 2020. – №4 (25) – С. 11–16.

5. Григорьев, Н. П. Автоматизированное рабочее место расчета входных и взаимных сопротивлений системы внешнего электроснабжения / Н.П. Григорьев, В.А. Ковалев // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона – 2021. – № 1(26) – С. 54–60.

6. Григорьев, Н. П. Расчет входных и взаимных сопротивлений системы внешнего электроснабжения / Н.П. Григорьев, В.А. Ковалев, И.Г. Копай // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона – 2021. – №3(28) – С. 37-42.

7. Григорьев, Н. П. Повышение качества взаимодействия систем внешнего и тягового электроснабжения / Н.П. Григорьев, В.А. Ковалев, И.Г. Копай // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2022. – Т. 2. – С. 98-100.

8. Григорьев, Н. П. Повышение качества взаимодействия систем тягового и внешнего электроснабжения / Н. П. Григорьев, В. А. Ковалев, И. Г. Копай // Электропривод на транспорте и в промышленности: материалы III Всероссийской научно-практической конференции: посвящается 60-летию кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика», Хабаровск, 19–20 октября 2023 года. – Хабаровск: ДВГУПС, 2023. – С. 135-145.

Прочие публикации

9. Повышение срока службы силовых трансформаторов в системе обеспечения движения поездов / Н. П. Григорьев, А. В. Воприков, В. А. Ковалев, А. П. Парфианович, П. Н. Трофимович // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. – № 4 (49). – С. 26–29.

10. Повышение эффективности работы систем внешнего и тягового электроснабжения / Н. П. Григорьев, И. В. Игнатенко, В. А. Ковалев, П. Н. Трофимович // Известия вузов. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 4-5. – С. 72-78. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-72-78.

11. Повышение точности расчета схем питания тяговых нагрузок железных дорог переменного тока 25 кВ / Н. П. Григорьев, И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, В. А. Ковалев, И. Г. Копай // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2022. – № 3. – С. 116–127.

12. Григорьев, Н.П. Повышение эффективности взаимодействия систем тягового и внешнего электроснабжения / Н. П. Григорьев, В. А. Ковалев, И. Г. Копай // Уче-

ные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2023. – № 5(69). – С. 36-42.

Авторские свидетельства

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662832 Российская Федерация. Расчет интервалов детерминированных значений мгновенных схем расчетного периода: № 2022662106: заявл. 27.06.2022 : опубл. 07.07.2022 / Н. П. Григорьев, А. П. Парфианович, И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, В.А. Ковалев, И.Г, Копай; заявитель ФГБОУ ВО ДВГУПС.

Личный вклад соискателя. Основные положения и результаты диссертационной работы получены соискателем самостоятельно. Личный вклад соискателя в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [1] – разработка алгоритма расчета временных входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП; [2, 3, 7, 9, 10] – разработка новых схем присоединения тяговых подстанций участка ДВЖД Ласточка – Сибирцево к ЛЭП и тяговой сети, сравнительный анализ показателей взаимодействия СТЭ и СВЭ при существующих и новых схемах присоединения; [4] – анализ существующих способов регулирования напряжения в СТЭ переменного тока 25 кВ для выполнения графика движения поездов; [5, 6] – разработка математической модели и автоматизированного рабочего места расчета временных входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП; [8] – анализ взаимодействия СТЭ переменного тока 25 кВ и СВЭ; [11] – расчет коэффициентов распределения токов ЭПС по плечам тяговых подстанций в СТЭ переменного тока 25 кВ с учетом временных входных сопротивлений узлов присоединения подстанций к ЛЭП; [12] – разработка базы данных электрических сетей СВЭ, питающей тяговые нагрузки СТЭ ДВЖД, для определения временных входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП; [13] – разработка алгоритма и программного кода.

Ковалев Владимир Александрович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ ВНЕШНЕГО И ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА 25 КВ

Специальность 2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 23.04.2024 г. Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,4. Зак. 85. Тираж 100 экз.

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