

*На правах рукописи*



ПАРФИАНОВИЧ Арсений Петрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ  
ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА  
НАПРЯЖЕНИЕМ 25 кВ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Хабаровск – 2018

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 «Электрификация и электроснабжение» 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»

Защита состоится 2 июля 2018 г. в 9 час. 00 мин. на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.086.03, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Амурский государственный университет» по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, просп. Ленина, 27, корпус 3, аудитория 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета или на его веб-сайте [https://sovet.knastu.ru/diss\\_defense/show/89](https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/89)

Автореферат разослан

Учёный секретарь  
диссертационного совета



А. С. Гудим

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Одной из проблем в системе тягового электро-снабжения при повышении скорости электроподвижного состава является поддержание уровня напряжения в тяговой сети для выполнения графика движения поездов. Стратегия развития ОАО «РЖД» до 2030 года предусматривает увеличение скорости и весовых норм поездов, что приведет к повышению потерь напряжения и нагрузки тяговых подстанций. Выполнение перспективных графиков движения поездов возможно на основе применения новых методов регулирования напряжения.

Другой задачей, направленной на повышение эффективности работы системы тягового электроснабжения, является снижение дополнительных потерь электрической энергии, которые повышают величину расхода электрической энергии, нагрузку тяговой сети и соответственно ограничивают пропускную способность участков электрифицированных железных дорог. Энергетическая стратегия холдинга ОАО «РЖД» до 2030 года предусматривает снижение потерь электрической энергии.

Оперативное управление показателями работы осуществляется энергодиспетчером включением и отключением коммутационных аппаратов, а также изменением коэффициентов трансформации силовых трансформаторов тяговых подстанций ступенчато по ситуации. Поездной диспетчер при необходимости обращается за повышением уровня напряжения в тяговой сети к энергодиспетчеру. Энергодиспетчер реагирует реактивным действием на ситуацию. В соответствии со стратегией научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» до 2020 г. и на перспективу до 2025 г., что требует необходимости перехода от реактивного управления к прогнозированию ситуаций.

Из сказанного следует, что тема диссертационного исследования «Повышение эффективности работы системы тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ» является актуальной.

**Степень разработанности темы исследования.** Диссертационное 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, А.Н. Заварнакин, В.Н. Зажирко, В.П. Закарюкин, А.Б. Косарев, А.В. Крюков, Р.Р. Мамошин, Г.Г. Марквардт, К.Г. Марквардт, В.Е. Марский, Г.П. Маслов, Э.В. Тер-Оганов, В.Т. Черемисин, Kawahara Keiji, Li Xia-qing и др).

**Объектом** исследования является система тягового электроснабжения железных дорог переменного тока напряжением 25 кВ, с учетом совместной работы системы внешнего электроснабжения.

**Предметом** исследования являются управление напряжением и потерями электрической энергии в тяговой сети и трансформаторах тяговых подстанций переменного тока напряжением 25 кВ.

**Цель исследования** – разработка мероприятий, направленных на повышение эффективности работы на основе встречного интервального регулирования в системе тягового электроснабжения переменного тока.

Для достижения поставленной цели сформулированы основные задачи.

1. Проанализировать факторы, влияющие на показатели работы системы тягового электроснабжения железных дорог переменного тока.

2. Усовершенствовать систему тягового электроснабжения железных дорог переменного тока.

3. Разработать алгоритмы выбора интервалов времени для управления напряжением и потерями электрической энергии в тяговой сети и трансформаторах тяговых подстанций.

4. Оценить технико-экономическую эффективность разработанных мероприятий, направленных на повышение эффективности работы системы тягового электроснабжения.

**Научная новизна** результатов диссертационного исследования заключается в следующем.

1. Разработана методика встречного интервального регулирования показателями работы системы тягового электроснабжения.

2. Предложена информационная модель системы тягового электроснабжения переменного тока для выбора интервалов времени встречного интервального регулирования показателями работы системы тягового электроснабжения.

**Теоретическая и практическая ценность** результатов диссертационного исследования заключается в следующем.

1. Разработана методика определения нормальных схем питания тяговых нагрузок.

2. Предложена методика снижения потерь электрической энергии в системе тягового электроснабжения.

3. Получено новое распределительное устройство 27,5 кВ для повышения эффективности работы системы тягового электроснабжения.

**Личный вклад автора** заключается в непосредственном участии в формулировке гипотезы о возможности встречного интервального управления напряжением в системе тягового электроснабжения для выполнения графика движения поездов с минимальными потерями электрической энергии на основе определенной последовательности дискретных мгновенных значений токов и напряжения, в теоретическом обосновании и получении практических результатов для доказательств выдвинутой гипотезы.

**Методы исследования.** Полученные результаты теоретических исследований базируются на корректном использовании математической статистики, методов анализа сложных систем, электротехники, программирования и теории математического моделирования, теории электроснабжения системы электрифицированных железных дорог переменного тока.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Встречное интервальное регулирование показателями работы системы тягового электроснабжения напряжением 25 кВ.

2. Информационная модель системы тягового электроснабжения напряжением 25 кВ.

3. Алгоритм определения рационального числа работы в интервалах времени силовых трансформаторов тяговых подстанций по потерям электрической энергии.

4. Новая схема распределительного устройства 27,5 кВ для повышения эффективности работы системы тягового электроснабжения.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается обоснованностью полученных выводов, базирующихся на строго доказанных и корректно используемых положениях прикладных и фундаментальных наук, а также на результатах работ ученых и специалистов, посвященных проблемам повышения эффективности системы тягового электроснабжения. Новизна технических решений, представленных в работе, подтверждена двумя патентами на изобретение.

Практическая часть исследования выполнялась с использованием статистических данных показателей работы реального участка системы тягового электроснабжения, полученных на сертифицированных устройствах учета и контроля показателей качества электрической энергии. Расчеты по моделированию работы системы тягового электроснабжения производились стандартными методами, применяемыми в научных исследованиях и проектной практике.

Основные положения работы доложены и обсуждены на: 8-м международном симпозиуме «Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта», Eltrans'2015 (г. Санкт-Петербург, 7–9 октября 2015 г., ПГУПС); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности транспортной системы региона: проблемы и перспективы» (г. Хабаровск, 21–22 октября 2015 г., ДВГУПС); Международной заочной научно-практической конференции «Математическое и экспериментальное моделирование физических процессов» (г. Биробиджан, 20 декабря 2016 г.); Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием «Научно-техническое и социально-экономическое развитие транспорта и промышленности стран АТР» (г. Хабаровск, 18–20 апреля, 2017 г.); заседаниях кафедры «Системы электроснабжения» ДВГУПС и научно-технических семинарах кафедр Электроэнергетического института ДВГУПС (г. Хабаровск, ДВГУПС, 2014–2017 гг.).

**Научные достижения.** Новизна и значимость полученных результатов диссертационного исследования подтверждена награждением автора дипломом I степени за научный доклад на тему «Информационная модель системы тягового электроснабжения 25 кВ» на Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием «Научно-техническое

и социально-экономическое развитие транспорта и промышленности стран АТР» (г. Хабаровск, 18–20 апреля, 2017 г.).

**Результаты работы внедрены** на Уссурийской дистанции электроснабжения ДвостЖД для определения вариантов задания на разработку проектов по модернизации тяговых подстанций, с учетом новых решений в распределительном устройстве 27,5 кВ, а также в учебный процесс кафедры «Системы электроснабжения» ДВГУПС при подготовке студентов, обучающихся по направлению 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов» (специализация «Электроснабжение железных дорог»).

**Публикации.** Основные положения и выводы по рассматриваемым в диссертации вопросам нашли отражение в 11 печатных работах, в том числе в трех статьях, две из которых опубликованы в журнале, входящем в международную систему цитирования Scopus, третья – в журнале перечня ВАК Российской Федерации, а также в двух патентах на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 98 наименований и двух приложений; содержит 116 страниц текста, включая 33 рисунка и 19 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** раскрыта актуальность, научная и практическая значимость темы исследования, определена цель работы, сформулированы задачи для ее достижения, а также положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** изложен приведенный анализ показателей работы системы тягового электроснабжения (СТЭ), современных технологий, направленных на выполнение графика движения поездов и схем распределительных устройств (РУ) тяговых подстанций.

Одной из главных проблем и задач СТЭ является поддержание уровня напряжения в тяговой сети для выполнения графика движения поездов. Уровень напряжения в тяговой сети влияет на скорость электроподвижного состава. Регулирование напряжения осуществляется изменением коэффициентов трансформации устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) силовых трансформаторов тяговых подстанций (далее именуется тяговые трансформаторы). Тяговые трансформаторы предусматривают автоматическое регулирование напряжения под нагрузкой (АРПН).

Использование устройств поперечной компенсации (КУ) снижает потребление реактивной мощности путем снижения индуктивной составляющей тока тяговых нагрузок, что приводит к снижению реактивной составляющей мощности нагрузки и соответственно к снижению потерь напряжения. Применение продольной ёмкостной компенсации не только снижает входное индуктивное сопротивление тяговых нагрузок, но и повышает напряжение в тяговой сети.

Включение двух тяговых трансформаторов на параллельную работу снижает ток обмоток трансформаторов и потери напряжения в обмотках.

Однако, несмотря на положительный опыт Горьковской и других дорог, применение комплекса мероприятий, методик, направленных на повышение эффективности работы СТЭ, не в полной мере реализуют встречное регулирование напряжения.

Потери электроэнергии в СТЭ ( $\Delta W$ ) определяются по формуле

$$\Delta W = \Delta W_{\text{тр}} + \Delta W_{\text{тс}} + \Delta W_{\text{д}}, \quad (1)$$

где  $\Delta W_{\text{тр}}$ ,  $\Delta W_{\text{тс}}$ ,  $\Delta W_{\text{д}}$  – потери электрической энергии соответственно в тяговых трансформаторах подстанций, тяговой сети и дополнительные потери, кВт·ч.

Снижение потерь электрической энергии в тяговых трансформаторах  $\Delta W_{\text{тр}}$  зависит от числа в работе тяговых трансформаторов подстанций.

Важно отметить, что расчет потерь мощности и энергии в тяговых трансформаторах по методике для симметричных нагрузок приводит к значительной погрешности, так как не учитывается особенность работы системы тягового электроснабжения.

Потери электрической энергии в тяговой сети  $\Delta W_{\text{тс}}$  системы тягового электроснабжения без учета разности напряжения шин смежных подстанций можно снизить выбором схем питания тяговой сети и применением устройств поперечной компенсации реактивной мощности.

Дополнительные потери электрической энергии определяются по формуле

$$\Delta W_{\text{д}} = \int_0^t |\dot{I}_y|^2 R_T dt, \quad (2)$$

где  $R_T$  – активное сопротивление контура протекания уравнивающего тока, Ом;  $t$  – время протекания уравнивающего тока, с.

Неравенство векторов напряжений на шинах смежных тяговых подстанций, питающих одну межподстанционную зону при двусторонней схеме тяговой сети, создает уравнивающий ток, который определяется по формуле

$$\dot{I}_y = (\dot{U}_A - \dot{U}_B) / \underline{Z}_{\text{тс}}, \quad (3)$$

где  $\underline{Z}_{\text{тс}}$  – комплексное сопротивление контура тяговой сети.

Ограничение дополнительных потерь электрической энергии возможно переходом к схеме одностороннего питания тяговых нагрузок, при этом увеличиваются  $\Delta W_{\text{тс}}$ . Снижение разности напряжения плеч смежных тяговых подстанций возможно путем выбора ступени устройства РПН. Однако заметим, что существующие система измерения показателей работы тяговой сети и схема распределительного устройства 27,5 кВ не позволяют выполнить регулирование разности напряжения по плечам питания.

При анализе работы и выборе мероприятий, направленных на повышение эффективности работы СТЭ, широко применяется имитационное моделирование. Использование программных комплексов КОРТЭС, «Fazonord» и других позволяют определить величину расхода электрической энергии на тягу поез-

дов, эффективный ток фидеров контактной сети и напряжение в тяговой сети, и прочее.

Поскольку исходные данные, применяемые в программных комплексах, не в полной мере учитывают не только действительные напряжения на шинах подстанций, но и графики движения поездов, а также и другое, то это значит, что результаты моделирования содержат погрешность расчета. Поэтому результаты расчетов не позволяют определить прогнозные положения коммутационных аппаратов и ступени устройств РПН в интервалах времени.

На сегодняшний день учет интегральных показателей электрической энергии осуществляется автоматизированной информационно-измерительной системой коммерческого учета электрической энергии (АИИСКУЭ). Однако учет только интегральных показателей работы СТЭ при выборе схем питания тяговых нагрузок для выполнения графика движения поездов с минимальными потерями электрической энергии не позволяет определить ни дисперсию тока, ни напряжение в интервалах времени.

В настоящее время регулирование показателей работы СТЭ выполняется при оперативной работе энергодиспетчером (ЭЧЦ) электрифицированных железных дорог или устройствами автоматики. Регулирование реализуется, как правило, ступенчато коммутационными аппаратами РУ и устройствами РПН. Включение в работу одного или двух тяговых трансформаторов, мощность устройств продольной и (или) поперечной ёмкостной компенсации, а также ступени устройств РПН тяговых трансформаторов выполняется реактивно в зависимости от поездной ситуации.

Существенное повышение эффективности организации перевозочной деятельности обеспечивает переход от реактивного управления и реагирования на происходящие события к выбору схем питания тяговых нагрузок путем прогнозирования развития ситуаций.

Анализом схем РУ высшего напряжения установлено, что для транзитной тяговой подстанции при ремонтной перемычке в работе и коротком замыкании (КЗ) в ЛЭП происходит отключение тяговой подстанции. На отпаечных тяговых подстанциях при подключении в работу двух тяговых трансформаторов к «своим» ЛЭП могут возникнуть значительные уравнительные токи в контуре: ЛЭП–тяговые трансформаторы–РУ 27,5 кВ, а подключение двух трансформаторов к одной ЛЭП приводит к возрастанию тока нагрузки на одну линию.

Существующее РУ 27,5 кВ выполнено по схеме, включающей одну секционированную систему двумя разъединителями и запасную системы шин, однако такая схема не может обеспечить общепринятое требование отдельной работы двух трансформаторов для РУ подстанций при напряжении РУ 35 кВ и ниже. Более того, при КЗ на одной секции шин отключается РУ 27,5 кВ. Следовательно, целесообразно разработать новую схему РУ 27,5 кВ.

В настоящее время в практической деятельности Федеральной сетевой компании единой энергетической системы применяется термин «нормальная схема электрических соединений» РУ. При этом нормальная схема электрических соединений утверждается на длительный период времени, например год,



следовательно, она соответствует только частному режиму работы, где графики нагрузок не учитываются.

В связи с резко переменными нагрузками в СТЭ электрифицированных железных дорог нормальная схема электрических соединений в принятой практической деятельности не соответствует критерию «норма» по показателям работы СТЭ. Следовательно, применение известных нормальных схем электрических соединений для выполнения графика движения поездов с минимальными потерями электрической энергии не обеспечит повышение эффективности работы СТЭ.

В главе 2 представлена разработанная информационная модель СТЭ, обоснован понятийный аппарат «нормальные схемы питания тяговых нагрузок» и критерии выбора нормальных схем питания тяговых нагрузок, а также новое РУ 27,5 кВ.

Получение прогнозных интервалов времени для выбора схем питания тяговых нагрузок с минимально возможной дисперсией параметров системы тягового электроснабжения возможно на основе предлагаемой информационной модели СТЭ.

Информационная модель системы тягового электроснабжения – это система определенных связанных устройств обеспечения движения поездов, система мониторинга показателей работы, база данных, система управления базами данных (СУБД) и имитационная модель для выбора положения коммутационных аппаратов и ступени РПН тяговых трансформаторов.

Логическая схема информационной модели СТЭ представлена на рис. 1.

Значения во времени напряжений плеч левого  $U_{л}(t)$  и правого  $U_{п}(t)$ , токов левого  $I_{л}(t)$  и правого  $I_{п}(t)$  плеча, а также углов сдвига их относительно питающего напряжения тяговой сети  $\varphi_{л}(t)$ ,  $\varphi_{п}(t)$  при достаточном значении интервала квантования измерения регистрируются в виде мгновенных схем. Поэтому предлагается функции токов и напряжений фиксировать в базе данных в виде графиков показателей мгновенных схем:

$$U_{л}(t) \cong U_{лj}, U_{п}(t) \cong U_{пj}, I_{л}(t) \cong I_{лj}, \varphi_{л}(t) \cong \varphi_{лj}, I_{п}(t) \cong I_{пj}, \varphi_{п}(t) \cong \varphi_{пj}.$$

Исполненные графики движения поездов, схемы питания тяговых нагрузок и показатели совместной работы СТЭ, а также внешнего электроснабжения – учитываются результатами мониторинга.

Для реального участка системы электроснабжения количество мгновенных схем ( $m$ ) в течение суток ( $T$ ) определяем по формуле

$$m = T / \Delta t, \quad (4)$$

где  $\Delta t$  – интервал квантования, с.

Напряжение распределительных устройств тяговой подстанции фиксируется датчиками напряжений вводов тягового 5, районного 6 и высшего 7 напряжения и регистрируется блоком регистрации напряжения 16.



Рис. 1. Логическая схема информационной модели СТЭ

Модуль тока и угол сдвига относительно напряжения для мгновенной схемы с порядковым номером  $j$  тяговой подстанции фиксируется датчиками токов фидеров контактной сети 1, районных нагрузок 2 и вводов распределительных устройств тягового 3, районного 4 напряжений. Измеренные токи фиксируются блоком регистрации токов 14.

Угол тока относительно питающего напряжения определяется датчиками углов вводов тягового 8 и районного 9 напряжений. Полученные результаты фиксируются блоком регистрации углов 15.

Модель СТЭ предусматривает получение значений измеряемых параметров мгновенных схем с порядковыми номерами  $j$  для всех поездов  $k$  на межподстанционных зонах датчиками: времени 22; координат поезда 25; тока 23 и напряжения 24.

Потери мощности и электрической энергии тяговых трансформаторов фиксируются в блоке регистрации потерь мощности и электрической энергии 17 информационной модели.

Измеренные параметры мгновенных схем поездной ситуации фиксируются в блоке анализа исполненных графиков движения поездов 18 для оценки влияния местоположения и тока поездов на показатели работы СТЭ.

Переключение коммутационных аппаратов и устройств РПН, а также фиксация израсходованного ресурса передается в блок определения израсходованного ресурса 19.

Статистическая обработка показателей работы СТЭ, полученных мониторингом, позволяет определить интервалы времени прогнозных нормальных схем питания тяговых нагрузок. Нормальные схемы питания тяговых нагрузок, выбранные на расчетные интервалы времени, по прогнозному состоянию показателей работы системы тягового электроснабжения определены блоком 20 и выполняются СУБД.

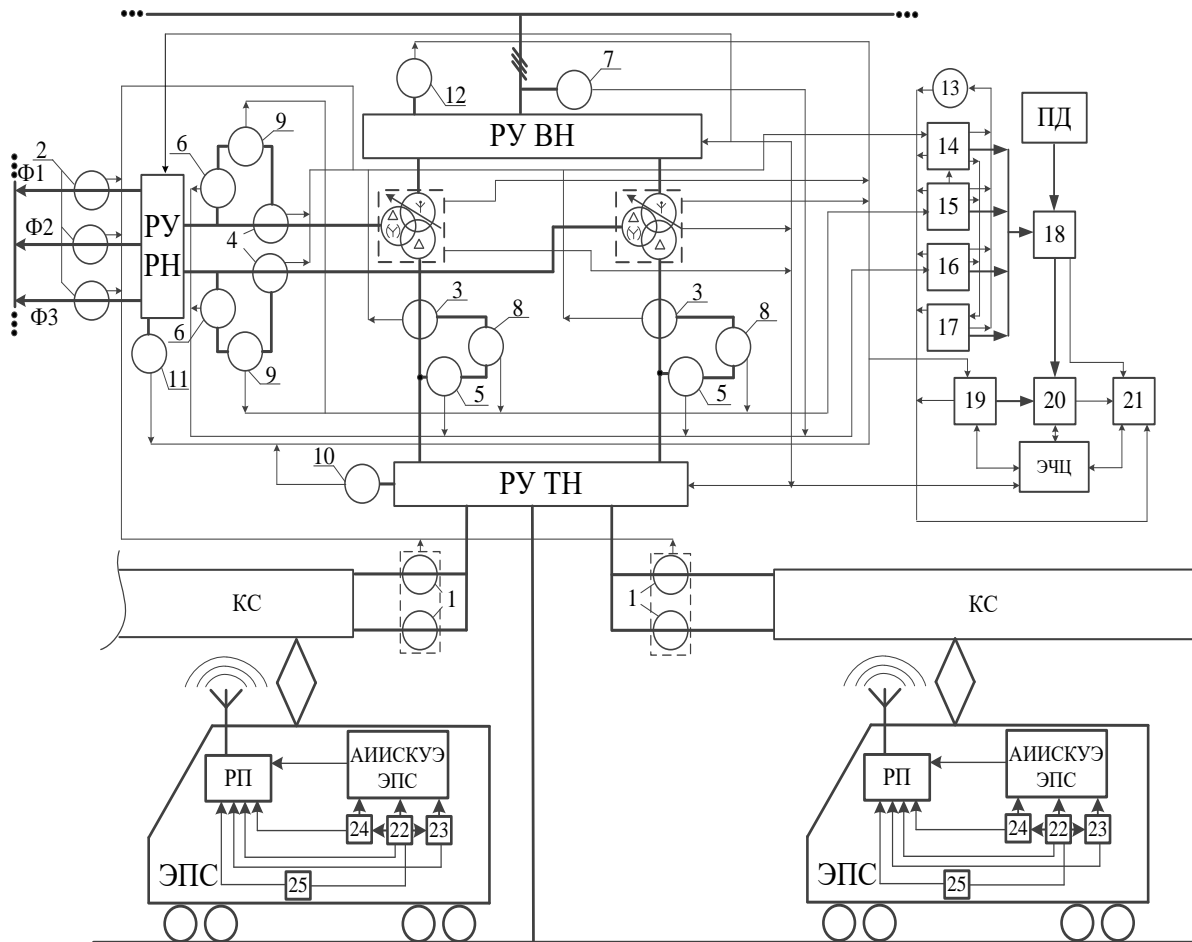


Рис. 2. Структурная схема информационной модели СТЭ

Предлагаемая информационная модель содержит решения, защищенные патентом на изобретение № 2595088: «Система электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока».

Измеренные значения параметров СТЭ фиксируются в базе данных 21 для анализа таких показателей работы при учете поездной ситуации, как: тип и количество локомотивов, вагонов, вес состава, профиль пути и др.

Число мгновенных схем в интервале времени определяется методом последовательного приближения в СУБД. Критерием числа мгновенных схем в интервале времени  $i$  является соответствие значения интегральных показателей работы СТЭ предельно допустимой дисперсии, например тока и напряжения  $[D_I]$ ,  $[D_U]$ , которые устанавливаются для каждого конкретного участка опытным путем. Пример для тока и напряжения иллюстрируют следующие формулы:

$$D(I_{(i)}) \leq [D_I], D(U_{(i)}) \leq [D_U]. \quad (5)$$

Дисперсия тока интервала  $i$  по дискретным показателям мгновенных схем тока левого плеча определяется по формуле

$$D(I_{л(i)}) = \sum_{j=j_{н(i)}}^{j_{к(i)}} \left( I_{лj(i)} - \frac{1}{j_{к(i)} - j_{н(i)}} \sum_{j=j_{н(i)}}^{j_{к(i)}} I_{лj(i)} \right)^2, \quad (6)$$

где  $j_{к(i)}$  – конечный порядковый номер мгновенной схемы интервала времени  $i$ ;  $j_{н(i)}$  – начальный порядковый номер мгновенной схемы  $i$ -го интервала времени.

Снижение количества переключений коммутационных аппаратов РУ тяговых подстанций и тяговой сети предлагается производить выбор схемы питания тяговых нагрузок на максимально возможный интервал времени, с учетом допустимой дисперсии.

Эффективный ток  $I_{э(i)}$  в интервале времени  $i$  определяется по формуле

$$I_{э(i)} = \sqrt{\frac{1}{j_{к(i)} - j_{н(i)}} \sum_{j=j_{н(i)}}^{j_{к(i)}} I_{j(i)}^2}. \quad (7)$$

Получение интегральных значений показателей работы СТЭ для интервала времени с порядковым номером  $i$  выполняется статистической обработкой значений измерений мгновенных схем. Продолжительность  $i$ -го интервала времени  $t_i$  определяется по формуле

$$t_i = (j_{к(i)} - j_{н(i)}) \Delta t. \quad (8)$$

Закономерность повторения внутрисуточных интервалов времени предлагается получить анализом суточных графиков по дням недели и чисел каждого месяца. Полученные схемы питания тяговых нагрузок, графики нагрузок СТЭ, напряжения в точках и другое хранятся в базе данных и служат для определения прогнозного состояния показателей на перспективные сутки, с учетом дня недели и числа месяца.

Предлагаемая информационная модель позволяет повысить достоверность прогнозирования состояния СТЭ на основе последовательности дискретных значений мгновенных схем. Выбор интервалов времени обеспечивает определение рациональных схем питания тяговых нагрузок для встречного интервального управления повышением технико-экономических показателей работы СТЭ.

Известное понятие «нормальные схемы электрических соединений объектов электроэнергетики» применительно к СТЭ не соответствует значению «норма» (в соответствии с толковым словарем), т.к. оно обозначает «общее правило», «нормальное состояние, законное, правильное». Поэтому под нормальной схемой питания тяговых нагрузок СТЭ следует понимать схему распределительных устройств, для которых определено положение коммутационных аппаратов и устройств регулирования, обеспечивающих напряжение в тя-

говой сети для выполнения графика движения поездов с минимальными потерями электрической энергии в интервале времени.

Для определения критериев выбора нормальных схем предложено понятие «формы нормальных схем питания тяговых нагрузок».

Первая форма нормальной схемы питания тяговых нагрузок гарантирует для всех  $k$ -х поездов в интервале времени  $i$  напряжение  $U_{ik}$ , которое не ниже минимального и не выше максимального предельно допустимого напряжения. Следовательно, критерий по первой форме нормальных схем питания тяговых нагрузок примет следующий вид

$$[U_{\min}] \leq U_{ik} \leq [U_{\max}], \quad (9)$$

где  $i = 1 \dots m$ ,  $m$  – число интервалов времени в сутках;  $[U_{\min}]$  – минимальное предельно допустимое напряжение на токоприемнике поезда и шинах тяговых подстанций кВ;  $[U_{\max}]$  – максимальное предельно допустимое напряжение на токоприемнике поезда и шинах тяговых подстанций, кВ.

Напряжение для времени интервала  $t_i$  нормальной схемы питания тяговых нагрузок межподстанционной зоны определено неизменным положением коммутационных аппаратов и устройств РПН подстанций:

$$U_{ik} = f(KA_{i,q}, PH_{i,j}, t_i). \quad (10)$$

Положение коммутационных аппаратов РУ ( $KA_{i,q}$ ) и ступень устройств РПН ( $PH_{i,j}$ ) нормальной схемы питания тяговых нагрузок обеспечивают напряжение в тяговой сети для выполнения графика движения поездов в интервале  $i$ .

Вторая форма нормальной схемы питания тяговых нагрузок обеспечивает первую форму и минимизирует в СТЭ потери электрической энергии  $\Delta W_{(i)}$  в интервале  $i$ .

Третья форма нормальной схемы питания тяговых нагрузок обеспечивает соответствие первой и второй форм нормальной схемы и рациональное применение ресурса коммутационных аппаратов и устройств РПН для повышения эффективности работы СТЭ. Определять число коммутаций для выполнения первой и второй форм нормальных схем предлагается на расчетный период, с учетом остаточного ресурса коммутационных аппаратов и устройств РПН.

Выбор нормальных схем питания тяговых нагрузок на расчетный интервал времени по предложенным формам обеспечивает выполнение графика движения поездов с минимальными потерями электрической энергии и рациональное использование коммутационных аппаратов и устройств РПН.

Для повышения эффективности работы СТЭ предложено новое распределительное устройство 27,5 кВ (рис 3).

Новое РУ 27,5 кВ выполнено по схеме одна рабочая секционированная выключателем и двумя обходными системами шин. Секционирование рабочей системы шин двухполюсным выключателем позволяет при двух в работе тяговых трансформаторах отключать секционный выключатель. Такая схема питания тяговых нагрузок позволяет повысить эффективность работы тяговой подстанции, а именно:

- 1) регулировать напряжение по плечам питания устройствами РПН тяговых трансформаторов;
- 2) снижать потери электрической энергии от уравнивающих токов в контуре: ЛЭП–тяговые трансформаторы–РУ 27,5 кВ;
- 3) снижать потери напряжения в точках присоединения отпаечной подстанции к ЛЭП;
- 4) обеспечивать селективное отключение при коротком замыкании на секции системы шин 27,5 кВ.

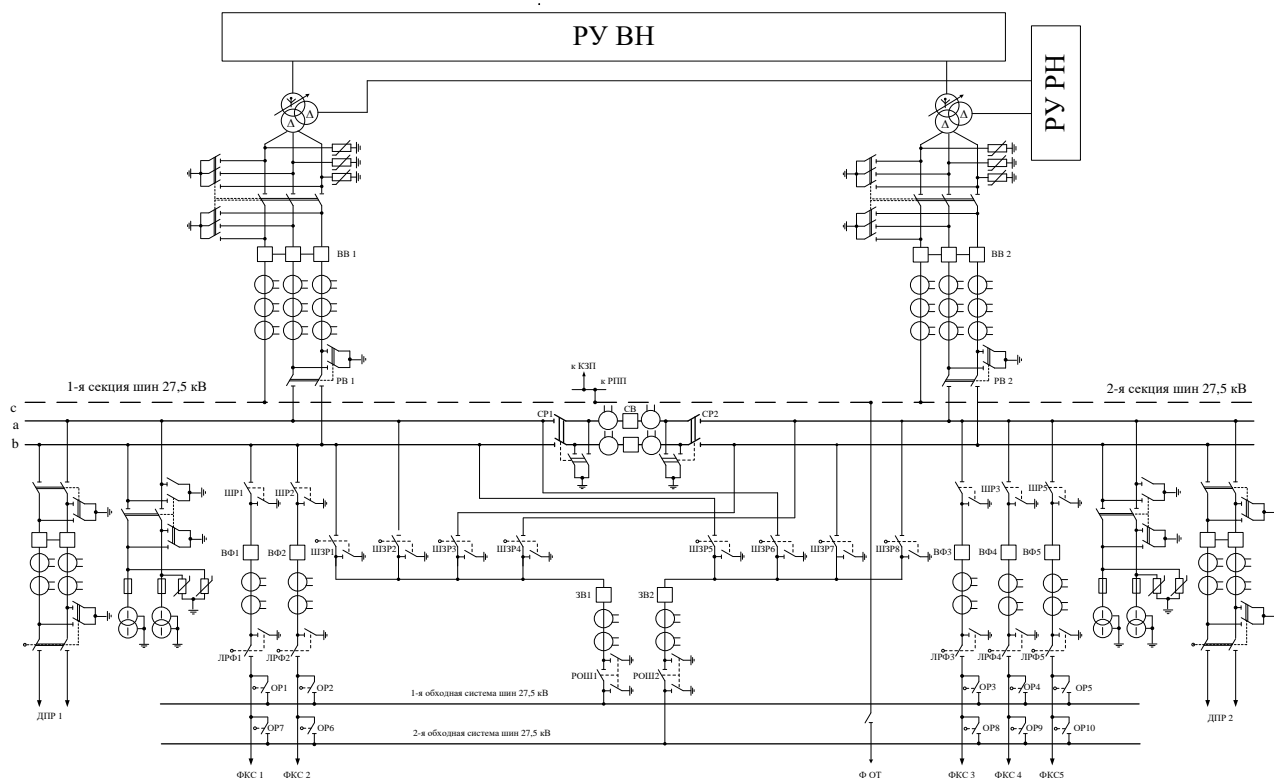


Рис 3. Схема нового распределительного устройства 27,5 кВ

Новизна предложенной схемы РУ 27,5 кВ подтверждена патентом на изобретение № 2596046: «Тяговая подстанция переменного тока для питания тяговых нагрузок 25 кВ».

В главе 3 представлены две разработанные методики: методика определения напряжения плеч питания тяговых подстанций и методика определения потерь электрической энергии в тяговых трансформаторах, а также алгоритм оценки погрешности исходных данных и имитационной модели.

Одним из показателей исходных данных в моделях анализа работы СТЭ является напряжение на шинах тяговых подстанций. Напряжение на шинах плеч питания тяговых подстанций переменного тока получено с учетом совместной работы систем тягового и внешнего электроснабжения. Напряжение левого и правого плеч подстанций определено по формулам прямого расчета.

Суточные графики токов плеч, уравнивающих токов и районных нагрузок по формулам прямого расчета позволяют получить график напряжения правого и левого плеча питания. Полученный график обеспечивает выполнение расче-

тов системы тягового электроснабжения, с учетом действительных напряжений на шинах тяговых подстанций.

Потери мощности в обмотках тягового трансформатора определены пофазно, с учетом графика тяговых и районных нагрузок. Потери мощности для  $j$ -й мгновенной схемы при одном в работе трансформаторе определяются по уточненной формуле (11), при двух – по формуле (12):

$$\Delta P_{1j} = \Delta P_{x.x} k_U + \left( \begin{aligned} & \left( I_{ВЛj}^2 + I_{ВНj}^2 + I_{ВПj}^2 \right) R_B + \left( I_{ТЛj}^2 + I_{ТНj}^2 + I_{ТПj}^2 \right) R_T + \\ & + 3 \left( \frac{P_{Pj}^2 + Q_{Pj}^2}{U_{Pj}^2} \right) R_P \end{aligned} \right) 10^{-3}, \quad (11)$$

где  $\Delta P_{x.x}$  – потери холостого хода трансформатора, кВт;  $k_U$  – коэффициент, учитывающий отношение действительного напряжения к номинальному обмоток высшего напряжения;  $I_{ВЛj}, I_{ВНj}, I_{ВПj}, I_{ТЛj}, I_{ТНj}, I_{ТПj}$  – ток обмоток высшего и тягового напряжения трансформатора соответственно левого (Л), правого (П) плеч и недогруженной (Н) обмотки, А;  $P_{Pj}$  – активная мощность районной нагрузки, кВт;  $Q_{Pj}$  – реактивная мощность районной нагрузки, кВАр;  $R_B, R_T, R_P$  – активное сопротивление обмоток высшего, тягового и районного напряжений тягового трансформатора, Ом, или

$$\Delta P_{2j} = 2\Delta P_{x.x} k_U + \frac{1}{2} \left( \begin{aligned} & \left( I_{ВЛj}^2 + I_{ВНj}^2 + I_{ВПj}^2 \right) R_B + \\ & + \left( I_{ТЛj}^2 + I_{ТНj}^2 + I_{ТПj}^2 \right) R_T + 3 \left( \frac{P_{Pj}^2 + Q_{Pj}^2}{U_{Pj}^2} \right) R_P \end{aligned} \right) 10^{-3}. \quad (12)$$

Потери электрической энергии при одном и двух тяговых трансформаторах для  $m$  мгновенных схем определяются по формулам:

$$\Delta W_1 = \left( \sum_{j=1}^m \Delta P_{1j} \right) \Delta t / 60, \quad \Delta W_2 = \left( \sum_{j=1}^m \Delta P_{2j} \right) \Delta t / 60. \quad (13)$$

Полученные интервалы времени для наименьших потерь электрической энергии при одном или двух силовых трансформаторах оформляются графиком включения в работу числа тяговых трансформаторов по минимальным потерям электрической энергии. Выбранные нормальные схемы питания тяговых нагрузок отображаются суточными матрицами переключения коммутационных аппаратов.

Алгоритм определения интервалов времени рациональной работы одного или двух силовых трансформаторов тяговых подстанций представлен блок схемой на рис. 4. Число работающих тяговых трансформаторов с минимальными потерями электрической энергии определяется при условии допустимой нагрузки. Потери мощности в обмотках и стали для одного  $\Delta P_{1j}$  и двух  $\Delta P_{2j}$  работающих

тяговых трансформаторов зафиксированы в блоке регистрации потерь мощности и электрической энергии 17 информационной модели (см. рис. 2). Последовательность мгновенных схем с неизменным знаком разности потерь мощности при одном и двух трансформаторах является критерием увеличения длительности интервала времени на одну схему. Блок-схема алгоритма выбора интервалов времени рационального числа в работе тяговых трансформаторов приведена на рис. 4, содержание блоков алгоритма – в табл. 1.

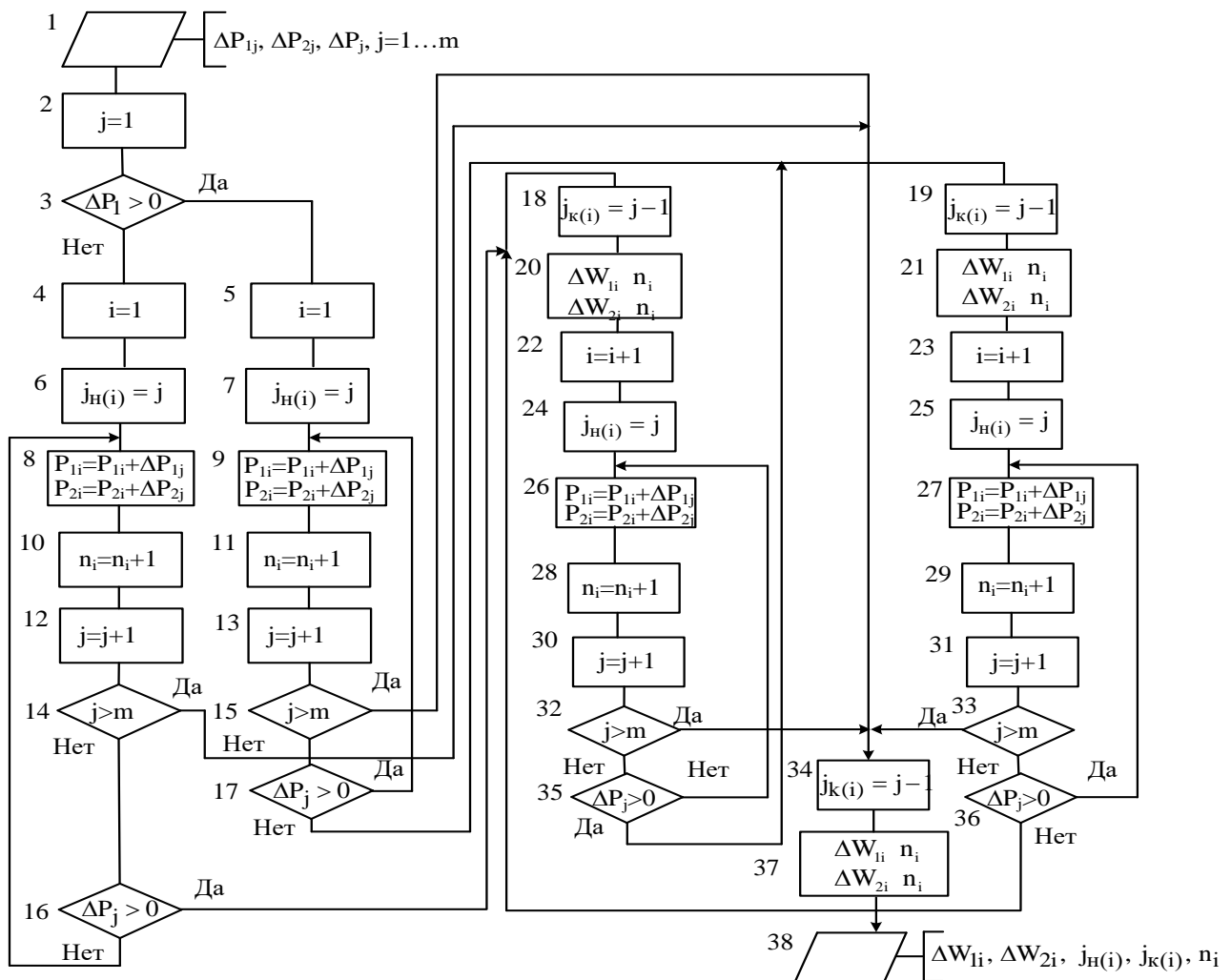


Рис. 4. Блок-схема алгоритма определения рационального по потерям электрической энергии числа в работе трансформаторов

Таблица 1. Содержание блоков алгоритма определения рационального по потерям электрической энергии числа в работе трансформаторов

№ блоков	Содержание
1	Ввод. Порядковые номера мгновенных схем ( $j=1\dots m$ ) и значение потерь мощности при одном работающем трансформаторе ( $\Delta P_{1j}$ ), двух ( $\Delta P_{2j}$ ) и их разность ( $\Delta P_j$ ) для мгновенной схемы $j$
2, 12, 13, 30, 31	Выбор порядкового номера мгновенной схемы
3, 16, 17, 35, 36	Сравнение потерь мощности $j$ -й мгновенной схемы при одном и двух тяговых трансформаторах



№ блоков	Содержание
4, 5, 22, 23	Определение порядкового номера интервала времени
6, 7, 24, 25	Определение порядкового номера мгновенной схемы, соответствующего началу интервала времени $i$
8,9, 26, 27	Расчет потерь мощности в интервале при одном и двух тяговых трансформаторах
10, 11, 28, 29	Расчет числа мгновенных схем в интервале $i$
12, 13, 30, 31	Переход к очередной мгновенной схеме
14, 15, 32, 33	Проверка рассмотрения всех мгновенных схем
16, 17, 35, 36	Выбор числа трансформаторов с минимальными потерями мощности мгновенной схемы
18, 19, 34	Определение порядкового номера мгновенной схемы, соответствующего концу интервала времени $i$
20, 21, 37	Определение средних потерь мощности при одном и двух в работе тяговых трансформаторах и числа мгновенных схем в интервале $i$
38	Вывод числа интервалов, потери электрической энергии при одном и двух трансформаторах

Переключение коммутационных аппаратов и устройств РПН приводит к расходу коммутационного ресурса. Фиксация израсходованного ресурса осуществляется датчиками расхода ресурса аппаратов распределительных устройств тягового 10, районного 11 и высшего 12 напряжений и передается в блок определения израсходованного ресурса 19 и базу данных 21 для хранения (см. рис. 2).

Критерий переключения числа трансформаторов по ресурсу коммутационных аппаратов определяется по формуле

$$\Delta W_i \leq [\Delta W_k], \quad (14)$$

где  $\Delta W_i$  – разность потерь электрической энергии в интервале времени;  $[\Delta W_k]$  – предельно допустимая разность потерь электрической энергии при одном и двух работающих трансформаторах в интервале для переключения.

Полученные нормальные схемы питания тяговых нагрузок отображаются суточными матрицами переключения коммутационных аппаратов  $Q_v$  распределительных устройств подстанции. Приведем пример суточной матрицы:

$$\|AQ\| = Q_v(i, t_n(ij), t_k(ij) \text{ к, q, j}), \quad (15)$$

где  $i$  – порядковый номер интервала:  $i = 1 \dots n_{ij}$ ;  $n_{ij}$  – число интервалов в сутках  $j$ ;  $t_n(ij)$ ,  $t_k(ij)$  – время начала и соответственно конца интервала  $i$  в сутках  $j$ ;  $k$  – порядковый номер распределительного устройства подстанции;  $q$  – порядковый номер выключателя.

Суточная матрица переключения ступени устройств РПН тягового трансформатора определяется следующим выражением и содержит ячейки для отображения ступеней устройств РПН  $Q_t$  в интервалах времени:

$$\|AT\| = Q_t(ij), t_n(ij), t_k(ij), \quad (16)$$

где  $i$  – порядковый номер интервала,  $i = 1 \dots n_{ij}$ ;  $j$  – сутки;  $n_{ij}$  – число интервалов в сутках  $j$ ;  $t_n(ij)$ ,  $t_k(ij)$  – время начала и соответственно конца интервала  $i$ .

Полученные матрицы переключения соответствуют критерию «норма», являются прогнозными и позволяют оперативному персоналу в определенное время выполнять встречное интервальное управление эффективностью работы системы тягового электроснабжения.

Определенные прогнозные матрицы переключения коммутационных аппаратов и ступени РПН могут не соответствовать матрицам исполненных графиков движения поездов. Прогнозные положения коммутационных аппаратов и ступени РПН изменяются при автоматических переключениях. Частота таких переключений зависит от погрешности исходных данных и (или) точности имитационной модели для определения матриц переключения.

Оценка погрешности исходных данных и имитационной модели выполняется по алгоритму, представленному блок-схемой (рис. 5). Содержание алгоритма представлено в табл. 2.

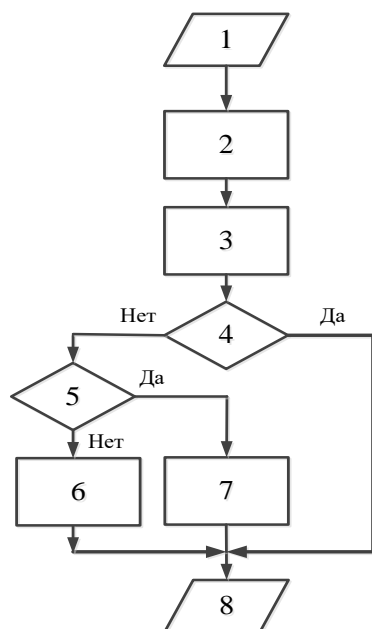


Рис. 5. Блок-схема алгоритма оценки погрешности исходных данных и имитационной модели

Погрешность исходных данных определяется сравнением прогнозного и исполненного графика поездов и нагрузок системы внешнего и тягового электроснабжения.

Погрешность имитационной модели определяется сравнением результатов расчета по исходным данным исполненного графика движения поездов и нагрузок. Анализ погрешности расчета матриц переключения позволяет назначить мероприятия, направленные на повышение точности имитационного моделирования СТЭ. Из сказанного следует, что предложенная информационная модель СТЭ позволяет выполнить проверку точности нормальных схем питания тяговых нагрузок.

Таблица 2. Содержание блоков алгоритма

№ п/п	Содержание блоков
1	График показателей движения поездов, тяговых и районных нагрузок, схемы внешнего и тягового электроснабжения
2	Выбор нормальных схем питания тяговых нагрузок исполненного графика движения поездов
3	Анализ исполненных и прогнозных нормальных схем питания тяговых нагрузок
4	Анализ погрешности прогнозных нормальных схем питания тяговых нагрузок
5	Погрешность исходных данных удовлетворительна
6	Корректировка исходных данных для расчета прогнозных нормальных схем
7	Корректировка имитационной модели системы тягового электроснабжения
8	Погрешность прогнозных нормальных схем. Рекомендации корректировки прогнозных исходных данных или имитационной модели

В главе 4 приведен результаты анализа показателей работы тяговой подстанции Уссурийск ДВостЖД, выбраны рациональные ступени РПН исполненного графика для определенных суточных интервалов времени.

Показатели работы тяговой подстанции Уссурийск получены прибором – анализатором качества электрической энергии (АКЭ-824). Прибор АКЭ-824 включен в Государственный реестр средств измерений РФ за № 36526-07. Измерение токов и напряжений плеч питания тяговой подстанции и углов между ними выполнено с интервалом квантования 1 с.

Проверка точности результатов измерений прибором АКЭ-824 выполнена путем сравнения расхода электрической энергии, полученной по показаниям сертифицированных счетчиков и расчетных значений по результатам измерений. Максимальная погрешность в интервалах времени составила 3,6 %.

Анализ напряжений плеч питания показал, что в течение суток средняя часовая разность напряжений правого ( $\bar{U}_п$ ) и левого ( $\bar{U}_л$ ) плеча питания составила 1250 В, а среднеквадратичное отклонение – 226 В. Значения часовых средних 3-минутных минимальных и максимальных напряжений плеч питания представлены на рис. 6.

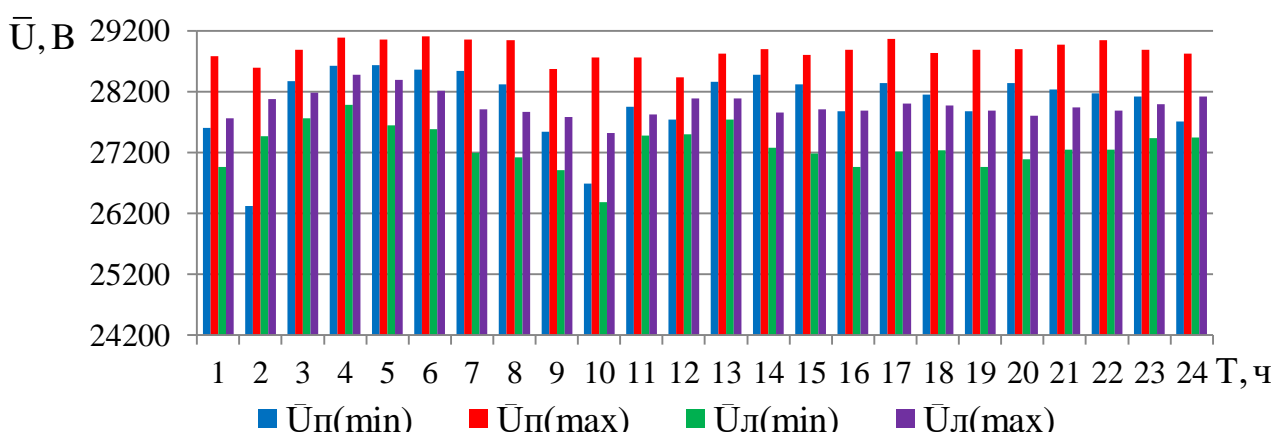


Рис. 6. Средние 3-минутные max и min напряжения плеч питания в час на 17.03.17 г.

Среднесуточные напряжения плеч питания тяговой подстанции в течение трех суток (17.03.17, 18.03.17, 19.03.17) с 0:00:00 по 23:59:59 ч представлены гистограммой на рис. 7. Результаты измерения установлено в течение трех суток превышение напряжения левого плеча над правым плечом питания тяговой сети. Применение нового РУ 27,5 кВ при подключении двух тяговых трансформаторов и отдельной работе секций позволяет выполнить регулирование напряжения по плечам питания. Закономерность превышения среднего угла правого плеча питания относительно левого в течение трех последовательных дней подтверждает наличие значительного уравнительного тока. Повышение напряжения левого плеча, с учетом применения нового РУ 27,5 кВ выполнено выбором ступени РПН тягового трансформатора. По результатам измерения для даты 17.03.17 выбраны ступени РПН, где по условию в течение часа максимальное 3-минутное напряжение не превышает 29 кВ. Результаты расчета выбора ступени РПН и интервалы регулирования приведены в табл. 3.

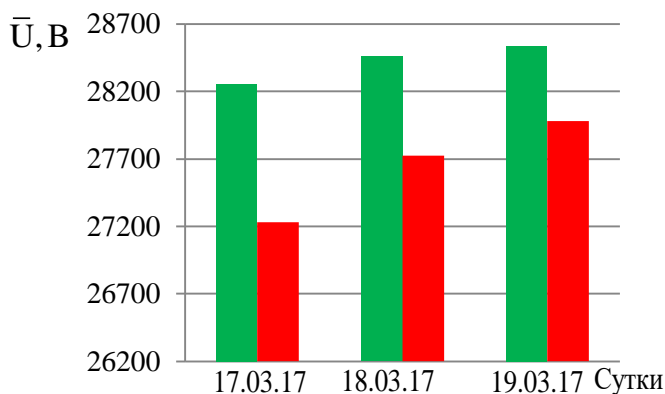


Рис. 7. Гистограмма среднесуточного напряжения плеч питания

При выбранных на дату 17.03.17 ступенях РПН тягового трансформатора по результатам статистической обработки суточных замеров для реальной тяговой подстанции получено 8 интервалов часового регулирования за сутки (0-1, 1-6, 6-9, 9-10, 10-11, 11-13, 13-23, 23-24). Полученные интервалы времени подтверждают техническое доказательство применения встречного интервального управления показателями работы системы тягового электроснабжения. Результаты выбора приведены в табл. 3.

Таблица 3. Рациональные ступени РПН

Час	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Выбранная ступень РПН	7	8	8	8	8	8	7	7	7	6	7	8	8
Номер интервала	1	2				3			4	5	6		

Продолжение таблицы 3

Час	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Выбранная ступень РПН	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	8
Номер интервала	7										8

При выбранных ступенях часового регулирования устройства РПН средние 3-минутное максимальное и минимальное напряжения левого плеча питания тяговой подстанции приведены на гистограмме (рис. 8). Нетрудно видеть, что напряжение в тяговой сети повышено, находится в допустимых пределах и обеспечивает повышение скорости движения поездов.

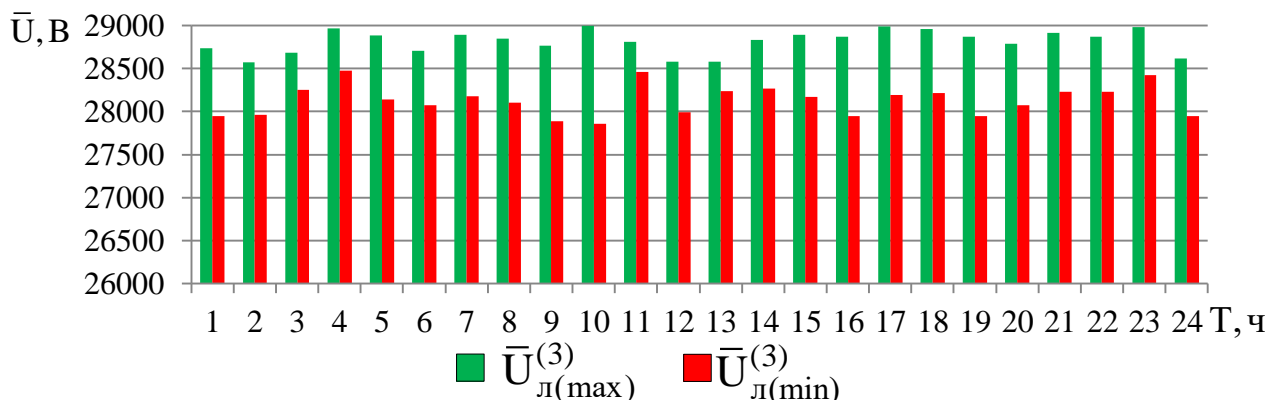


Рис. 8. Средние 3-минутные максимальные (max) и минимальные (min) часовые напряжения при выбранных ступенях РПН трансформатора на 17.03.2017 г.

Средняя часовая разность напряжений между правым и левым плечом при измерениях ( $\Delta\bar{U}_И$ ) и выбранных ( $\Delta\bar{U}_В$ ) рациональных ступеней устройств РПН приведена на рис. 9.

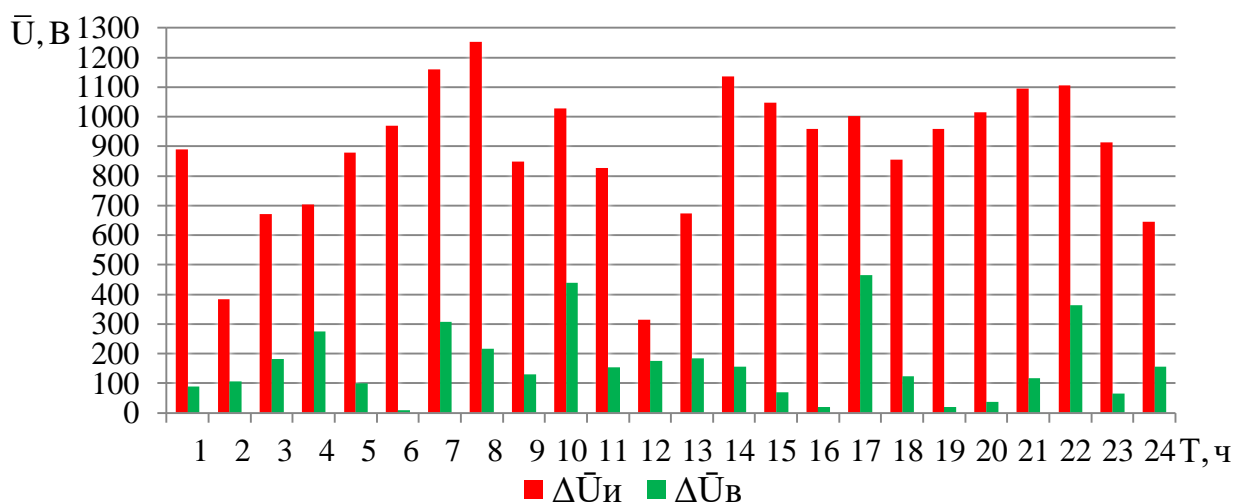


Рис. 9. Средняя часовая разность напряжения правого и левого плеча установленных и выбранных рациональных ступеней РПН на 17.03.2017 г.

При этом разность напряжения плеч питания от 895 снижена до 165 В, а среднеквадратичное отклонение напряжения изменено от 226 до 122 В.

Аналогичным образом снижается разность напряжения плеч питания смежных подстанций, питающих одну межподстанционную зону для ограничения уравнительного тока.

Таким образом, применение нового РУ 27,5 кВ позволяет снизить уравнительный ток и получить годовую экономию 760 тыс. руб/год.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Доказано повышение эффективности системы тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ для выполнения графика движения поездов и снижения потерь электрической энергии при встречном интервальном управлении.

2. Разработана информационная модель системы тягового электроснабжения для определения интервалов времени регулирования напряжения и потерь электрической энергии.

3. Применение нового распределительного устройства 27,5 кВ обеспечивает интервальное регулирование напряжения по плечам питания тяговых подстанций для снижения их разности и ограничения дополнительных потерь электрической энергии.

4. Предложена новая технология оперативного управления в системе тягового электроснабжения на основе матриц переключений коммутационных аппаратов и устройств РПН по выбранным нормальным схемам питания тяговых нагрузок.

5. Результаты расчета годовой экономии благодаря применению нового распределительного устройства 27,5 кВ для реальной тяговой подстанции составляют 760 тыс. руб в год.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статья, входящая в международную систему цитирования Scopus**

1. Григорьев, Н.П., Повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ / Н.П. Григорьев, М.С. Клыков, А.П. Парфианович, В.И. Шестухина // *Электротехника* – 2016. – № 2 – С. 58–60 (05.09.00 – электротехника).

2. Григорьев, Н.П. Повышение срока службы изоляции обмоток силовых трансформаторов при реконструкции тяговых подстанций переменного тока 25 кВ / Н.П. Григорьев, А.В. Воприков, А.П. Парфианович // *Электротехника* – 2016. – № 2 – С. 45–49 (05.09.00 – электротехника).

### **Статьи в журналах и изданиях перечня ВАК Российской Федерации**

3. Григорьев, Н.П. Повышение ресурса обмоток тяговых трансформаторов подстанций переменного тока 25 кВ выбором схем питания тяговой сети / Н.П. Григорьев, А.В. Воприков, А.П. Парфианович // *Наука и техника транспорта* – 2015. – № 1 – С. 109–113 (05.22.00 – транспорт).

### **Патенты**

4. Пат. 2595088 Российская Федерация, МПК В60М 3/02 (01.2006). Система электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока / Н.П. Григорьев, А.П. Парфианович, А.В. Воприков, М.С. Клыков; заявитель и патентообладатель Дальневосточный гос. ун-т. путей сообщения. – № 2015109354; заявл. 17.03.2015; опубл; 20.08.2016, Бюл. № 23. – 2 с. : ил.

5. Пат. 2596046 Российская Федерация, МПК Н02 В 5/00 (01.2006), Тяговая подстанция переменного тока для питания тяговых нагрузок 25 кВ / Н.П. Григорьев, А.П. Парфианович; заявитель и патентообладатель Дальневосточный гос. ун-т. путей сообщения. – № 2015113102; заявл. 9.04.2015; опубл; 27.08.2016, Бюл. № 24. – 2 с. : ил.

### **Прочие публикации**

6. Власенко, С.А. Повышение энергоэффективности работы электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ выбором нормальных схем питания тяговых нагрузок / С.А. Власенко, Н.П. Григорьев, А.П. Парфианович // *Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта : материалы VII междунар. симп. «Элтранс-2015», 7–9 окт. 2015г., Санкт-Петербург. – СПб. : ФГБОУ ВОПГУПС, 2017. – С. 88–92.*

7. Григорьев, Н.П. Нормальные схемы питания тяговых нагрузок / Н.П. Григорьев, С.А. Власенко, А.П. Парфианович // *Повышение эффективности транспортной системы региона: проблемы и перспективы : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. В 3 т. Т 2. / Под ред. С.М. Гончарука. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. С. 63–69.*

8. Григорьев, Н.П. Модель расчета напряжения на шинах тяговых подстанций переменного тока 25 кВ / Н.П. Григорьев, А.П. Парфианович, А.Р. Зощина // Математическое и экспериментальное моделирование физических процессов : сб. матер. междунар. заочной науч.-практ. конф. / под науч. ред. М. В. Кандели (г. Биробиджан, 20 декабря 2016 г.) – Биробиджан : Изд-во Приамур. гос. ун-та им. Шолом-Алейхема, 2017. – С. 126–132.

9. Григорьев, Н.П. Управление потерями электрической энергии в силовых трансформаторах тяговых подстанций / Н.П. Григорьев, А.П. Парфианович, А.А. Вукотич // Математическое и экспериментальное моделирование физических процессов : сб. матер. междунар. заочной науч.-практ. конф. / под науч. ред. М.В. Кандели (г. Биробиджан, 20 декабря 2016 г.) – Биробиджан : Изд-во Приамур. гос. ун-та им. Шолом-Алейхема, 2017. – С. 132–139.

10. Григорьев, Н.П. Информационная модель системы тягового электропитания 25 кВ / Н.П. Григорьев, А.П. Парфианович, А.В. Воприков // Научно-техническое и социально-экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : тр. Всерос. науч.-практ. конф. творч. молодежи с междунар. участ. В 2 т. Т. 1 / под ред. С.А. Кудрявцева (г. Хабаровск, 18–21 апреля 2017 года). – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2017. – С. 102–107.

11. Григорьев, Н.П. Снижение потерь электрической энергии в силовых трансформаторах тяговых подстанций 25 кВ / Н.П. Григорьев, А.П. Парфианович, А.В. Воприков // Научно-техническое и социально-экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : тр. Всерос. науч.-практ. конф. творч. молодежи с междунар. участ. В 2 т. Т. 1 / под ред. С.А. Кудрявцева (г. Хабаровск, 18–21 апреля 2017 года). – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2017. – С. 46–50.