

На правах рукописи



ВОПРИКОВ Антон Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИЛОВЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Хабаровск – 2016

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 «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II»;

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

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

Защита состоится 26 января 2017 г. в 10 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 технический 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, пр. Ленина, 27 корпус 3, аудитория 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета или на его веб-сайт http://sovet.knastu.ru/diss_solutions.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



А. С. Гудим

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. По данным холдинга ОАО «РЖД» в 2014 году расход электрической энергии на тягу поездов и объемы перевозки грузов составляли соответственно 40,6 млрд кВт·ч и 1226,9 млн тонн. Компания является одним из крупнейших потребителей электрической энергии в Российской Федерации.

Эксплуатационная длина электрифицированных железных дорог России насчитывает 43,35 тысяч км, в том числе на переменном токе 24,65 тысяч км. Система тягового электроснабжения включает 1422 подстанций, 763 из которых требуется модернизация и реконструкция.

Основным и наиболее дорогостоящим оборудованием тяговых подстанций железных дорог являются силовые трансформаторы. Нормативный срок службы силового маслонаполненного трансформатора в основном определяется разрушением твердой изоляции обмоток. Полный срок службы отработали более 81 % силовых и понижающих трансформаторов тяговых подстанций.

Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года предусматривает повышение эффективности функционирования системы тягового электроснабжения посредством модернизации и реконструкции, продления срока эксплуатации дорогостоящего оборудования, сокращения удельных затрат на его обслуживание и др. Модернизация и реконструкция системы тягового электроснабжения являются долгосрочной программой развития и требуют значительных капитальных вложений. Вследствие существующего дефицита финансирования темпы обновления силовых трансформаторов в значительной степени уступают темпам их старения.

Следовательно, тема диссертационного исследования – повышение эффективности эксплуатации силовых трансформаторов тяговых подстанций железных дорог переменного тока в условиях их значительного износа – является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Диссертационное исследование выполнено на основе результатов работ известных отечественных и зарубежных ученых, которые занимались вопросами анализа технического состояния силовых трансформаторов: Б. А. Алексеева, И. В. Давиденко, Ю. Н. Львова, М. Хиткоута, С. В. Кулкарни и др.; нагрузочной способности и износа изоляции обмоток силовых трансформаторов: Я. Д. Баркана, В. В. Боднара, В. П. Васина, С. Б. Васютинского, А. В. Иванова-Смоленского, В. М. Монтзингера и др.; функционирования силовых трансформаторов на тяговых подстанциях системы электроснабжения железной дороги переменного тока: М. П. Бадера, В. Д. Бардушко, Ю. М. Бея, А. С. Бочева, В. П. Закарюкина, А. В. Крюкова, Р. Р. Мамошина, Г. Г. Марквардта, К. Г. Марквардта, В. Н. Пупынина, Е. П. Фигурнова, Т. В. Щурской и др.

Объектом исследования являются факторы, влияющие на срок эксплуатации силовых трансформаторов подстанций системы тягового электроснабжения железной дороги переменного тока 25 кВ по износу изоляции обмоток.

Предметом исследования являются мероприятия, направленные на продление срока эксплуатации силовых трансформаторов подстанций системы тягового электроснабжения железной дороги переменного тока 25 кВ по износу изоляции обмоток.

Цель исследования – разработка мероприятий, направленных на повышение эффективности эксплуатации силовых трансформаторов за счет продления срока их эксплуатации по износу изоляции обмоток.

Для достижения поставленной цели сформулированы основные задачи.

1. Анализ износа изоляции обмоток силовых трансформаторов тяговых подстанций железных дорог переменного тока.

2. Разработка способа учета износа изоляции обмоток силовых трансформаторов тяговых подстанций.

3. Разработка нового способа подключения силовых трансформаторов тяговых подстанций железных дорог переменного тока.

4. Усовершенствование системы тягового электроснабжения железных дорог переменного тока.

5. Разработка алгоритмов выбора схем питания тяговой сети и подключения силовых трансформаторов по новым схемам.

6. Оценка технико-экономической эффективности разработанных мероприятий.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в следующем.

1. Разработан способ пофазного учета износа изоляции обмоток силовых трансформаторов подстанций системы тягового электроснабжения железной дороги переменного тока, позволяющий провести анализ интенсивности и неравномерности износа изоляции обмоток.

2. Разработан новый способ подключения силовых трансформаторов тяговых подстанций железных дорог переменного тока к распределительным устройствам по новым схемам, обеспечивающий снижение интенсивности износа изоляции обмотки.

3. Разработан алгоритм выбора новых схем подключения силовых трансформаторов, посредством которого снижается неравномерность износа изоляции обмоток к концу срока эксплуатации трансформаторов.

Теоретическая и практическая ценность результатов диссертационного исследования заключается в следующем.

1. Доказана неравномерность износа изоляции обмоток силовых трансформаторов тяговых подстанций железных дорог переменного тока.

2. Предложенный способ пофазного учета износа изоляции обмоток позволяет определить мероприятия, направленные на продление срока эксплуатации трансформаторов.

3. Разработанный способ подключения силовых трансформаторов обеспечивает продление срока их эксплуатации за счет снижения интенсивности износа изоляции обмотки с наибольшим износом в новой схеме подключения.

4. Разработанный алгоритм выбора новых схем подключения силовых трансформаторов служит основой при определении мероприятий для продления срока их эксплуатации по износу изоляции обмоток за счет снижения неравномерности износа.

5. Усовершенствована система тягового электроснабжения железной дороги переменного тока устройствами пофазного контроля износа изоляции обмоток и автоматического выбора схем питания тяговой сети.

6. Разработана и внедрена методика выбора схем подключения действующих силовых трансформаторов, позволяющая снижать приведенные затраты на их эксплуатацию при реконструкции тяговых подстанций железных дорог переменного тока.

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии при обосновании неравномерности износа изоляции обмоток силовых трансформаторов тяговых подстанций переменного тока; формулировании гипотезы о возможности снижения неравномерности износа изоляции обмоток за счет выбора схем подключения трансформаторов к распределительным устройствам подстанции; разработке алгоритмов; во внедрении разработанных мероприятий в практическую деятельность.

Методы исследования. Полученные в работе результаты теоретических исследований базируются на использовании методов анализа сложных систем, математической статистики, электротехники, теплопередачи, химической кинетики, теории математического моделирования и динамического программирования работы системы тягового электроснабжения железной дороги переменного тока 25 кВ.

Положения, выносимые на защиту

1. Способ пофазного учета износа изоляции обмоток силовых трансформаторов тяговых подстанций системы электроснабжения железной дороги переменного тока.

2. Способ подключения силовых трансформаторов тяговых подстанций железных дорог переменного тока по новой схеме.

3. Алгоритм выбора новых схем подключения в течение срока эксплуатации силовых трансформаторов тяговых подстанций железных дорог переменного тока.

4. Усовершенствованная система тягового электроснабжения железной дороги переменного тока, содержащая устройства пофазного контроля износа изоляции обмоток силовых трансформаторов и автоматического выбора схемы питания тяговой сети.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается обоснованностью полученных выводов, базирующихся на строго доказанных и корректно используемых положениях фундаментальных и прикладных наук, результатах работ ученых и специалистов, посвященных проблемам повышения эффективности

эксплуатации силовых трансформаторов. Новизна технических решений, представленных в работе, подтверждена тремя патентами на изобретение.

При выполнении практической части исследования использовались статистические данные технико-экономических показателей работы реальных тяговых подстанций, полученные на сертифицированных устройствах учета электрической энергии, и стандартные методы расчета системы тягового электроснабжения, применяемых в проектной практике.

Основные положения работы докладывались и обсуждались: на Всероссийской научно-практической конференции «Электропривод на транспорте и в промышленности» (г. Хабаровск, 25–27 сентября 2013 г., ДВГУПС); 7-м международном симпозиуме «Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта», Eltrans'2013 (г. Санкт-Петербург 9–11 октября 2013 г. ПГУПС); Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием «Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке» (г. Хабаровск, 24–25 мая 2014 г. ДВГУПС); техническом семинаре (г. Хабаровск, 26 февраля 2015 г., Дальневосточная дирекция управления движением); Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием «Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке» (г. Хабаровск, 21–23 апреля 2015 г. ДВГУПС); 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); заседаниях и научно-технических семинарах кафедры «Системы электроснабжения» (г. Хабаровск, ДВГУПС, 2012–2016 гг.).

Научные достижения. Новизна и значимость полученных результатов диссертационного исследования признана награждением автора дипломом за III место (Всероссийский конкурс научных работ среди студентов и аспирантов по транспортной проблематике) в номинации «Инновационный, безопасный, экологичный и эффективный железнодорожный транспорт» за подготовку научной концепции на тему «Повышение эффективности работы силовых трансформаторов тяговых подстанций переменного тока 25 кВ».

Результаты работы внедрены на Уссурийской дистанции электроснабжения ДВостЖД для определения вариантов задания на разработку проектов при реконструкции тяговых подстанций, учитывающих продление срока эксплуатации силовых трансформаторов, а также в учебный процесс кафедры «Системы электроснабжения» ДВГУПС при подготовке студентов по направлению 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов» (специализация «Электроснабжение железных дорог») и на курсах повышения квалификации работников железнодорожного транспорта, обучающихся в институте дополнительного образования ДВГУПС.

Публикации. Основные выводы и предложения по рассматриваемым в диссертации вопросам нашли отражение в 12 печатных работах общим объемом 8,37 печ. л., в том числе в 4 статьях журналов, определенных перечнем ВАК РФ, в 3 патентах на изобретения и в 1 издании, входящем в международную систему цитирования Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 134 наименований и двух приложений, содержит 119 страниц текста, включая 21 рисунок и 23 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой главе** представлены результаты анализа износа изоляции обмоток силовых трансформаторов и факторов, влияющих на скорость износа; особенность условий работы силовых трансформаторов системы тягового электрооборудования железной дороги переменного тока 25 кВ (далее – тяговые трансформаторы). Предложены мероприятия повышения эффективности эксплуатации тяговых трансформаторов.

Известно, что интенсивность износа (относительная скорость старения) изоляции обмоток обусловлена пиролизом, гидролизом, окислением и другими факторами.

В диссертационном исследовании выполнен анализ стандартов, регламентирующих определение износа изоляции обмоток силовых трансформаторов: IEEE C57.91, ГОСТ 14209-85 и IEC 60076-7. В стандартах определен износ изоляции обмоток как экспоненциальная функция от температуры наиболее нагретой точки ($\Theta_{\text{ннт}}$) обмотки, что соответствует формуле, полученной в 30 годах XX столетия зарубежным ученым В. М. Монтзингером, которая имеет следующий вид

$$E = D \cdot \exp(-p\vartheta), \quad (1)$$

где E – срок эксплуатации изоляции, лет; D – постоянная, лет, p – постоянная, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; ϑ – температура наиболее нагретой точки, $^{\circ}\text{C}$.

Обозначенными выше стандартами определяется износ изоляции обмоток силовых трансформаторов без учета факторов: гидролиза и окисления. Для учета влияния гидролиза и окисления на изоляцию обмоток в работах профессора В. П. Васина была представлена уточненная формула Монтзингера, по которой наиболее полно определяется относительный износ изоляции обмоток за время T :

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0 + T} \exp \left[\ln 2 \cdot (\theta - 98) / \Delta + \alpha \cdot \ln(w / w_{\text{баз}}) + \right. \\ \left. + \beta \cdot \ln(K_{\text{к.ч}} / K_{\text{баз}}) + \gamma \cdot \ln(C_{\text{O}_2} / C_{\text{O}_2 \text{баз}}) \right] dt, \quad (2)$$

где θ – температура наиболее нагретой точки обмотки, $^{\circ}\text{C}$; Δ – температурный интервал, при изменении на который износ изоляции обмоток изменяется в два

раза; w – влагосодержание в изоляции, %; $K_{к.ч}$ – кислотное число масла, мг КОН/г; C_{O_2} – концентрация кислорода в масле, %; $w_{баз}$, $K_{баз}$ и $C_{O_2баз}$ – базовые значения w , $K_{к.ч}$ и C_{O_2} ; α , β , γ – множители.

Следовательно, интенсивность износа изоляции обмоток тяговых трансформаторов может быть снижена посредством системы мероприятий, направленных на уменьшение $\Theta_{инт}$ обмоток, нормализации влагосодержания изоляции обмоток, кислотного числа и концентрации кислорода трансформаторного масла.

В технической литературе и перечисленных выше стандартах износ изоляции обмоток силовых трансформаторов обозначают разными символами, например, E , F , L , ξ . В настоящей работе износ изоляции обмоток представлен в виде письменного знака L , интенсивность износа изоляции обмоток – L' , которая определяется как отношение L к расчетному периоду Δt : $L' = L/\Delta t$.

Из теории электроснабжения железных дорог переменного тока известно определение тока плеч питания тяговых подстанций, который обусловлен профилем железнодорожного пути, графиком движения поездов их весом и типом электровоза, длиной межподстанционных зон, схемой питания тяговой сети и др.

При общепринятой схеме подключения тяговых трансформаторов (рис. 1) распределение тока плеч питания в обмотках высшего напряжения (\dot{I}_{AX} , \dot{I}_{BY} , \dot{I}_{CZ}) принято определять по формулам:

$$\dot{I}_{AX} = \frac{2}{3} \cdot \dot{I}_{\Pi} - \frac{1}{3} \cdot \dot{I}_{Л}, \quad \dot{I}_{BY} = -\frac{1}{3} \cdot \dot{I}_{\Pi} - \frac{1}{3} \cdot \dot{I}_{Л}, \quad \dot{I}_{CZ} = -\frac{1}{3} \cdot \dot{I}_{\Pi} + \frac{2}{3} \cdot \dot{I}_{Л}, \quad (3)$$

где $\dot{I}_{Л}$ и \dot{I}_{Π} – токи соответственно левого и правого плеча питания подстанции, приведенные к высшему напряжению.

Результаты контрольных замеров подтверждают превышение нагрузки одного плеча над другим. При этом, например, для $|\dot{I}_{\Pi}| > |\dot{I}_{Л}|$, соотношение тока обмоток AX , BY и CZ имеет следующий вид

$$|\dot{I}_{AX}| > |\dot{I}_{CZ}| > |\dot{I}_{BY}|. \quad (4)$$

Решение уравнений (3) для схемы рис. 1 представлено векторной диаграммой напряжения и тока (рис. 2), в соответствии с которой, обмотка трансформатора BY является наименее нагруженной относительно обмоток AX и CZ , что обусловлено подключением тяговой обмотки by при помощи вводов «а» и «b» трансформатора к контактной сети левого и правого плеча питания подстанции, а ввода «с» – к рельсовой сети. Фаза линии электропередач (ЛЭП), соединенная с обмоткой BY является наименее загруженной относительно двух других фаз.

Векторная диаграмма рис. 2 получена при совмещении вектора фазы ЛЭП A с осью $+1$ на комплексной плоскости.

Следовательно, в рассмотренном подключении тягового трансформатора потери мощности в обмотках AX , BY и CZ (ΔP_{AX} , ΔP_{BY} и ΔP_{CZ}) соответствуют соотношению

$$\Delta P_{AX} > \Delta P_{CZ} > \Delta P_{BY}. \quad (5)$$

Соотношение потерь мощности (5) соответствует соотношениям температуры наиболее нагретых точек и износу изоляции обмоток

$$\Theta_{AX} > \Theta_{CZ} > \Theta_{BY}, L_{AX} > L_{CZ} > L_{BY}. \quad (6)$$

В соответствии с вышеизложенным в диссертационном исследовании установлена особенность неравномерного износа изоляции обмоток тяговых трансформаторов.

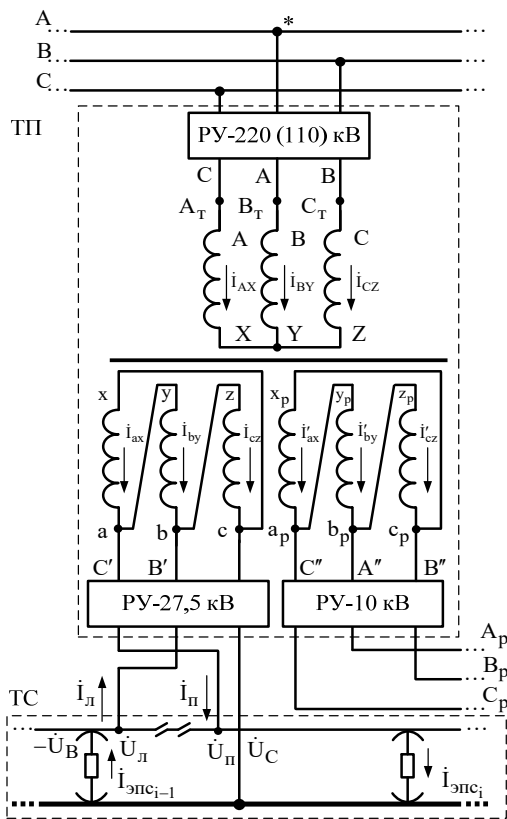


Рис. 1. Расчетная схема: * – наименее загруженная фаза ЛЭП; ЭПС – электроподвижной состав; ТП – тяговая подстанция; ТС – тяговая сеть; $\dot{U}_л$ и $\dot{U}_п$ – напряжение левого и правого плеча питания подстанции

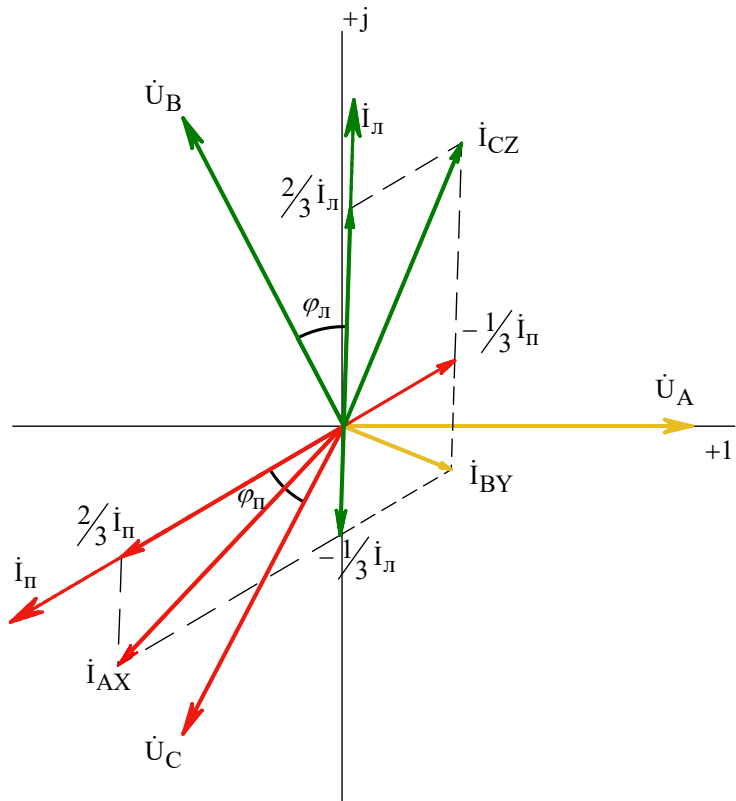


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжения и тока при подключении трансформатора по общепринятой схеме: $\varphi_л$ и $\varphi_п$ – угол между векторами напряжения и тока левого и правого плеча питания тяговой подстанции

Доказано, что износ изоляции обмотки ВУ минимален по сравнению с обмотками АХ и СЗ для всех тяговых трансформаторов, подключенных по общепринятой схеме. Очевидно, что определять неравномерность износа изоляции обмоток тяговых трансформаторов переменного тока возможно при пофазном учете износа.

Во второй главе представлен способ пофазного учета износа изоляции обмоток тяговых трансформаторов; рассмотрены разработанные мероприятия, направленные на снижение интенсивности износа изоляции обмоток тяговых

трансформаторов посредством выбора схем питания тяговой сети и новых схем их подключения.

Для оценки особенности износа изоляции обмоток тяговых трансформаторов железных дорог переменного тока разработан способ пофазного учета износа изоляции обмоток (L_{AX} , L_{BY} и L_{CZ}). Способ содержит формулы определения пофазного износа изоляции обмоток, интенсивности износа за расчетные периоды и устройство контроля износа изоляции обмоток тяговых трансформаторов.

Пофазный учет износа изоляции обмоток высшего напряжения в работе выполнен на основе уравнений профессора В. П. Васина. Износ изоляции каждой обмотки определен суммой износа за отдельный i -й интервал квантования измерения продолжительностью Δt , при котором $\Theta_{\text{ннт}}$ обмоток, влагосодержание изоляции, кислотное число и концентрация кислорода трансформаторного масла могут быть приняты постоянными:

$$\left. \begin{aligned} L_{AX} &= \sum_{i=1}^m \exp \left[\ln 2 \cdot (\theta_{AX_i} - 98) / \Delta + \alpha \cdot \ln(w_i / w_{\text{баз}}) + \beta \cdot \ln(K_{\text{к.ч}_i} / K_{\text{баз}}) + \gamma \cdot \ln(C_{O_2_i} / C_{O_2\text{баз}}) \right] \cdot \Delta t \\ L_{BY} &= \sum_{i=1}^m \exp \left[\ln 2 \cdot (\theta_{BY_i} - 98) / \Delta + \alpha \cdot \ln(w_i / w_{\text{баз}}) + \beta \cdot \ln(K_{\text{к.ч}_i} / K_{\text{баз}}) + \gamma \cdot \ln(C_{O_2_i} / C_{O_2\text{баз}}) \right] \cdot \Delta t \\ L_{CZ} &= \sum_{i=1}^m \exp \left[\ln 2 \cdot (\theta_{CZ_i} - 98) / \Delta + \alpha \cdot \ln(w_i / w_{\text{баз}}) + \beta \cdot \ln(K_{\text{к.ч}_i} / K_{\text{баз}}) + \gamma \cdot \ln(C_{O_2_i} / C_{O_2\text{баз}}) \right] \cdot \Delta t \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где θ_{AX_i} , θ_{BY_i} , и θ_{CZ_i} – температуры наиболее нагретых точек обмоток высшего напряжения AX, BY и CZ измерения i , $i = 1, 2 \dots m$; m – количество измерений износа изоляции обмоток ($m = T / \Delta t$; T – расчетный интервал времени эксплуатации трансформатора).

Пофазный учет интенсивности износа изоляции обмоток высшего напряжения тягового трансформатора за время T выполним по формулам:

$$L'_{AX_T} = L_{AX_T} / (m \cdot \Delta t), \quad L'_{BY_T} = L_{BY_T} / (m \cdot \Delta t), \quad L'_{CZ_T} = L_{CZ_T} / (m \cdot \Delta t). \quad (8)$$

В диссертационном исследовании усовершенствована система тягового электроснабжения посредством устройства пофазного контроля износа изоляции обмоток, структурная схема которого изображена на рис. 3.

Данное устройство содержит датчики: влажности трансформаторного масла 1; концентрации O_2 масла 2; $\Theta_{\text{ннт}}$ обмоток тяговой нагрузки и обмоток высшего напряжения 6; кислотного числа масла 7. Датчики соединены каналами связи 3 с блоками преобразования сигналов 4, которые подключены к блоку расчета износа изоляции обмоток 5. Блок расчета представляет собой ЭВМ с соответствующим программным обеспечением для пофазного определения износа изоляции обмоток.

От датчиков $\Theta_{\text{ннт}}$ обмоток тяговой нагрузки и обмоток высшего напряжения, влажности, концентрации кислорода и кислотного числа трансформатор-

ного масла по каналам связи передаются данные для преобразования (при необходимости) и передачи на ЭВМ, которая определяет износ изоляции обмотки тягового трансформатора за время T .

Устройство позволяет определять фактический износ изоляции обмоток тяговых трансформаторов, в соответствии с которым можно контролировать интенсивность износа и организовывать техническое обслуживание и ремонт по состоянию, а также разрабатывать мероприятия по снижению износа.

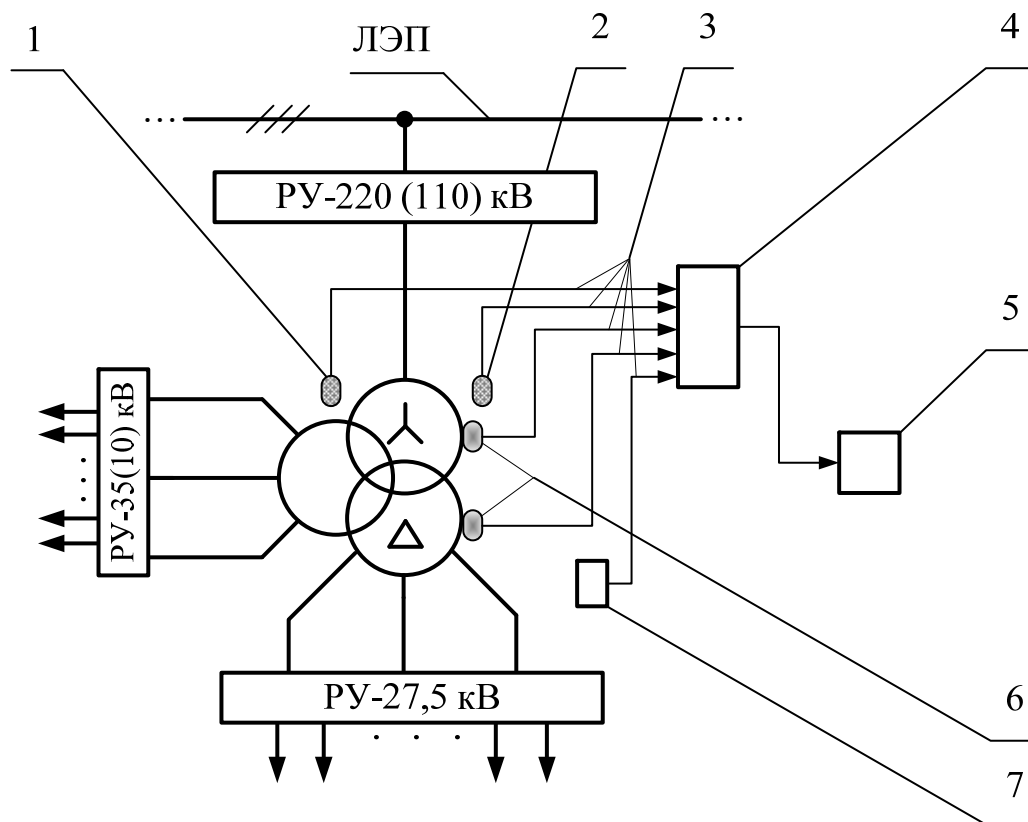


Рис. 3. Структурная схема устройства контроля износа изоляции обмоток тягового трансформатора

Новизна предложенного устройства мониторинга состояния изоляции обмоток тяговых трансформаторов переменного тока подтверждена патентом на изобретение № 2540685: «Система электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ».

В диссертационном исследовании рассмотрена работа отдельных участков системы тягового электроснабжения железной дороги переменного тока 25 кВ, на которых мощность плеча питания в некоторые интервалы времени направлена в сторону одной из подстанций, питающих тяговую нагрузку соответствующей межподстанционной зоны (рис. 4). Такая ситуация характерна для участков с резко переменными нагрузками и значительным уравнивающим током тяговой сети, когда схема одностороннего питания может быть эффективнее схемы двустороннего питания.

Известно, что схемы одностороннего и двустороннего питания тяговой сети влияют на ток плеча, следовательно, и на температуру наиболее нагретых точек обмоток тяговых трансформаторов подстанций.

В работе разработан алгоритм выбора схем одностороннего или двустороннего питания тяговой сети, посредством которого снижается интенсивность износа изоляции обмоток тяговых трансформаторов за счет уменьшения тока плеча.

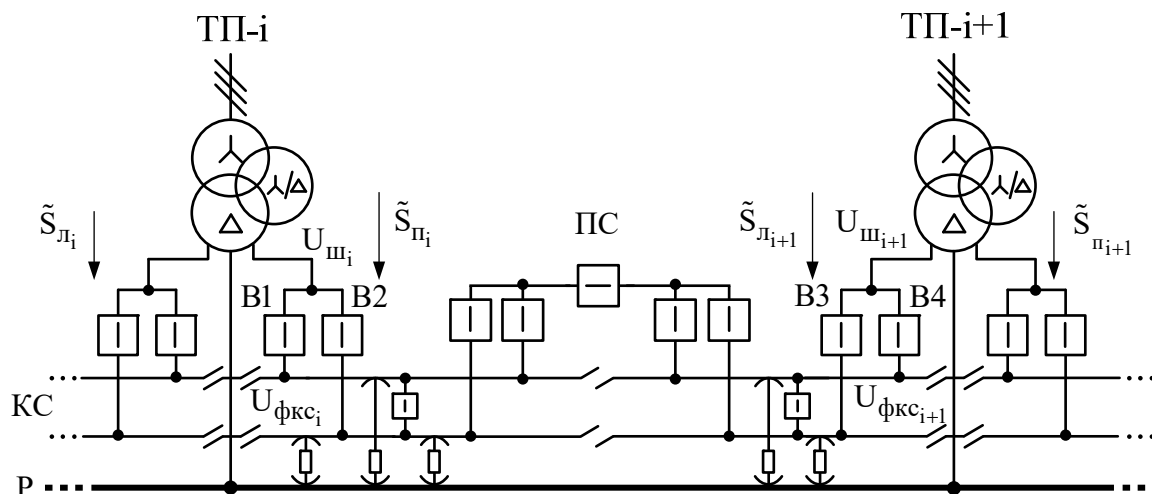


Рис. 4. Схема питания тяговой сети: $U_{ш}$ – напряжение на шинах РУ-27,5 кВ подстанций; $U_{фк_c}$ – напряжение на фидерах контактной сети подстанций; $\tilde{S}_{л_i}$, $\tilde{S}_{л_{i+1}}$ – мощность правого и левого плеча питания соответственно подстанции i и $i+1$ в комплексной форме записи

Условием перехода от схемы двустороннего к схеме одностороннего питания тяговой сети от подстанции i является направление активной мощности плеча питания к подстанции $i+1$ ($\text{Re}(\tilde{S}_{л_{i+1}}) < 0$).

Комплексная мощность левого плеча питания тяговых подстанций $i+1$ определяется по выражению

$$\tilde{S}_{л_{i+1}} = \dot{U}_{л_{i+1}} \dot{I}_{л_{i+1}}^* \quad (9)$$

где $\dot{U}_{л_{i+1}}$ – напряжение левого плеча питания подстанции $i+1$ в комплексной форме записи; $\dot{I}_{л_{i+1}}^*$ – сопряженный комплекс тока левого плеча питания подстанции $i+1$.

Снижение тока правого плеча питания подстанции i и соответственно обмоток тяговых трансформаторов производится за счет ограничения перетока мощности по подстанции $i+1$ посредством перевода выключателей В3 и В4 фидеров контактной сети в положение отключено.

Переход к схеме двустороннего питания осуществляется включением выключателей подстанции $i+1$ В3 и В4 фидеров контактной сети по условию

$U_{ш_{i+1}} > U_{фк_{i+1}}$. Критерием перехода от схемы двустороннего к схеме одностороннего питания тяговой сети от подстанции $i+1$ является направление активной мощности правого плеча питания к подстанции i ($\text{Re}(\tilde{S}_{П_i}) < 0$).

Для рассмотренных участков тяговой сети предложена усовершенствованная система электроснабжения железных дорог переменного тока 25 кВ, выполняющая автоматический переход к схемам одностороннего и двустороннего питания по условию снижения тока плеча питания подстанции. Новизна технического решения подтверждена патентом на изобретение № 2552572 «Система электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ».

На основе разработанного способа пофазного учета в диссертационном исследовании получена зависимость износа изоляции обмоток АХ, ВУ и СЗ от срока эксплуатации T тягового трансформатора. Износ изоляции обмоток представлен в виде прямолинейного тренда в соответствии с распределением тока плеч питания подстанции по обмоткам трансформатора (рис. 5).

В схеме подключения трансформатора рис. 1 при условии $|\dot{I}_{П}| > |\dot{I}_{Л}|$ износ изоляции обмотки АХ достигает предельно допустимого значения $[L]$ раньше, чем обмотка СЗ и ВУ. Достижение $[L]$ обмоткой АХ соответствует предельно допустимому времени эксплуатации трансформатора $[T_{э.Т}]$.

При выходе из строя трансформатора по износу изоляции обмотки АХ остаточный ресурс изоляции обмоток СЗ, ($\Delta L_{СЗ}$) и ВУ, ($\Delta L_{ВУ}$) может быть значительным:

$$\Delta L_{СЗ} = [L] - L_{СЗ}_{[T_{э.Т}]}, \quad \Delta L_{ВУ} = [L] - L_{ВУ}_{[T_{э.Т}]}$$

В соответствии с рис. 5 срок эксплуатации тягового трансформатора по износу изоляции лимитирует обмотка АХ при времени $[T_{э.Т}]$.

В работе получены новые схемы подключения тяговых трансформаторов переменного тока с наименованием «а» и «б» (рис. 6 и 7). Наименование схем подключения принято по одноименному обозначению ввода тяговых обмоток трансформатора, соединенного с рельсовой сетью.

Для снижения интенсивности износа изоляции обмотки АХ трансформатора разработана схема «б» (см. рис. 7). Подключение трансформатора по этой схеме приводит к следующему соотношению тока обмоток $|\dot{I}_{СЗ}| > |\dot{I}_{ВУ}| > |\dot{I}_{АХ}|$,

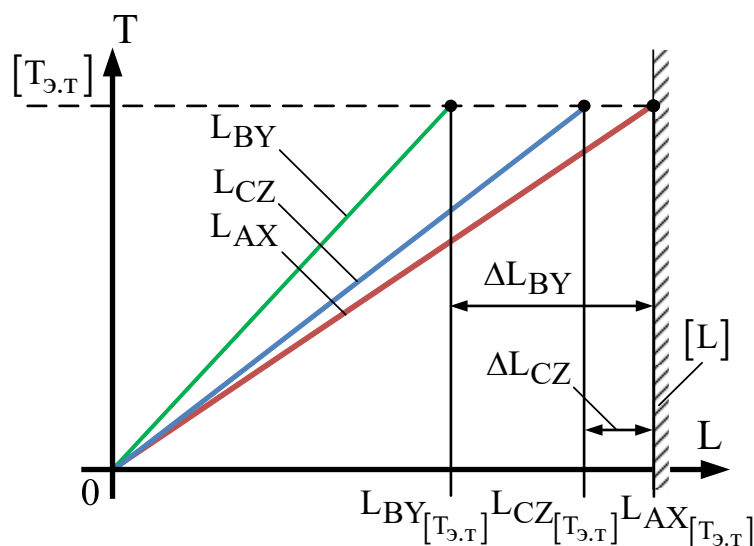


Рис. 5. Зависимость срока эксплуатации тягового трансформатора от износа изоляции обмоток при общепринятой схеме подключения

которое получено при условии $|\dot{I}_{\Pi}| > |\dot{I}_{Л}|$. Для снижения интенсивности износа изоляции обмотки CZ тягового трансформатора разработана схема «а». При условии $|\dot{I}_{\Pi}| > |\dot{I}_{Л}|$ соотношение тока обмоток соответствует следующему неравенству $|\dot{I}_{ВУ}| > |\dot{I}_{АХ}| > |\dot{I}_{СЗ}|$.

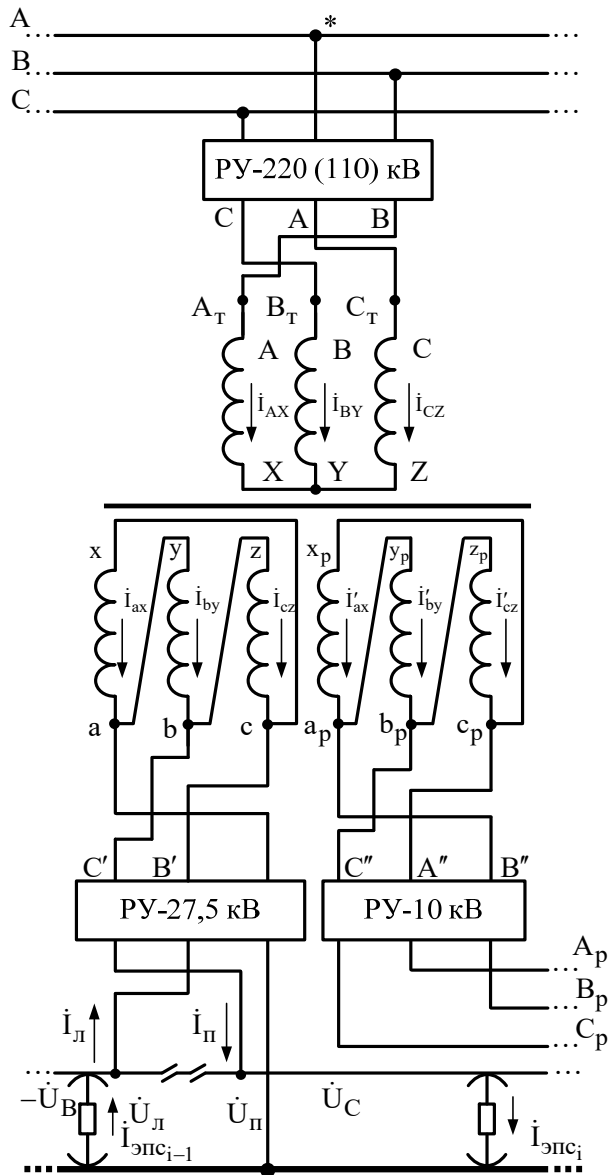


Рис. 6. Подключение трансформатора по схеме «а»

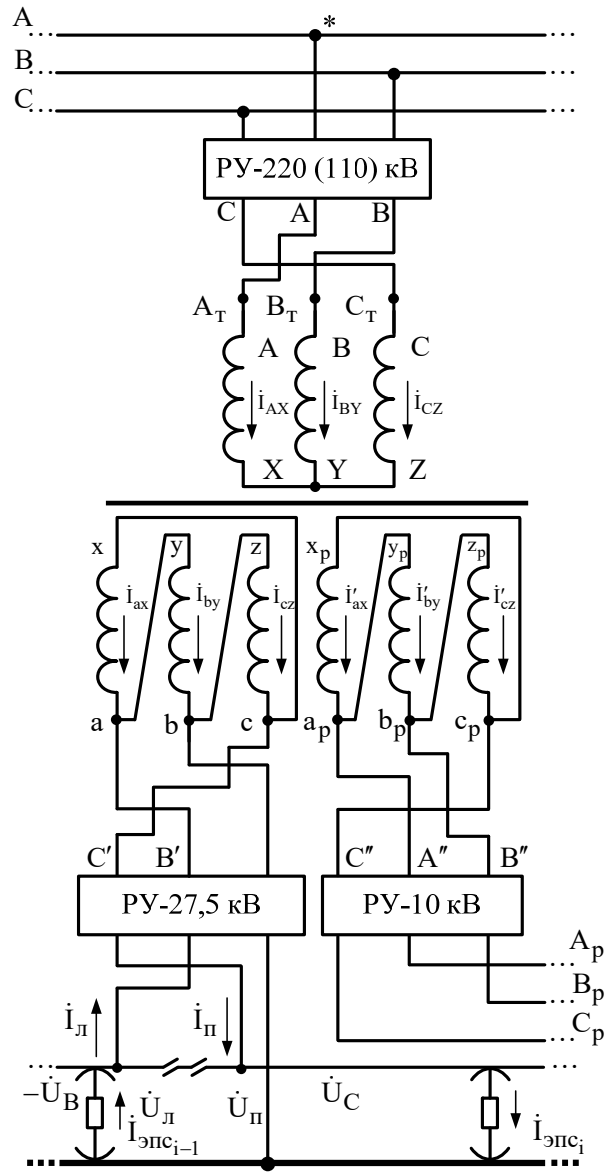


Рис. 7. Подключение трансформатора по схеме «b»

Подключение вводов тягового трансформатора к распределительным устройствам по новой схеме «а» или «b» выполняется таким образом, что сохраняются наименее загруженная фаза ЛЭП, напряжение левого и правого плеча питания тяговой подстанции и фаз районной сети (A_p , B_p и C_p) исходной схемы подключения (см. рис. 1).

На основе предложенных новых схем подключения тяговых трансформаторов переменного тока разработан способ, позволяющий продлить срок эксплуатации трансформаторов за счет снижения интенсивности износа изоляции обмотки в новой схеме, которая имела наибольший износ в предыдущей схеме.

Способ реализуется подключением обмотки, лимитирующей срок эксплуатации трансформатора по износу изоляции, к контактной сети левого и правого плеча питания подстанции через соответствующих два ввода, третий ввод тяговых обмоток соединяется с рельсовой сетью. Новизна технического решения подтверждена патентом на изобретение № 2540685: «Способ подключения тягового трансформатора системы переменного тока 25 кВ».

В третьей главе представлено решение задачи продления срока эксплуатации тяговых трансформаторов переменного тока на основе алгоритма выбора новых схем подключения по критерию количественного значения износа изоляции обмоток.

Разработанные новые схемы подключения тяговых трансформаторов уменьшают интенсивность износа изоляции только одной из обмоток и не обеспечивают снижения неравномерности износа.

Для снижения неравномерности износа изоляции обмоток и повышения эффективности эксплуатации тягового трансформатора необходимо решить следующие основные задачи.

1. Определить время подключения тягового трансформатора по новой схеме.
2. Выбрать новую схему подключения трансформатора.
3. Минимизировать количество схем подключения трансформатора за срок его эксплуатации.

Стратегия подключения тягового трансформатора по новой схеме определяется по условию снижения тока в обмотке с наибольшим износом за счет ее присоединения к контактной сети левого и правого плеча питания подстанции. Выбор схем подключения («а» или «b») тягового трансформатора, критерия перехода от одной схемы к другой схеме и их количества выполнен на основе теории метода динамического программирования. При рациональной стратегии выбора схем подключения тягового трансформатора неравномерность износа изоляции обмоток снижается к концу срока эксплуатации трансформатора, что соответствует соотношению $L_{AX_{max}} = L_{BY_{max}} = L_{CZ_{max}} = [L]$.

При этом максимальный износ изоляции обмоток трансформатора не может превышать предельно допустимого для каждой обмотки: $L_{AX_{max}} \leq [L]$, $L_{BY_{max}} \leq [L]$ и $L_{CZ_{max}} \leq [L]$.

Критерием перехода от одной схемы j к другой схеме $j+1$ подключения является среднее значение износа изоляции обмоток трансформатора в схеме j . Среднее значение износа изоляции обмоток трансформатора (\bar{L}_j) для схемы j определяется как среднее арифметическое значение суммы износа изоляции обмоток по формуле

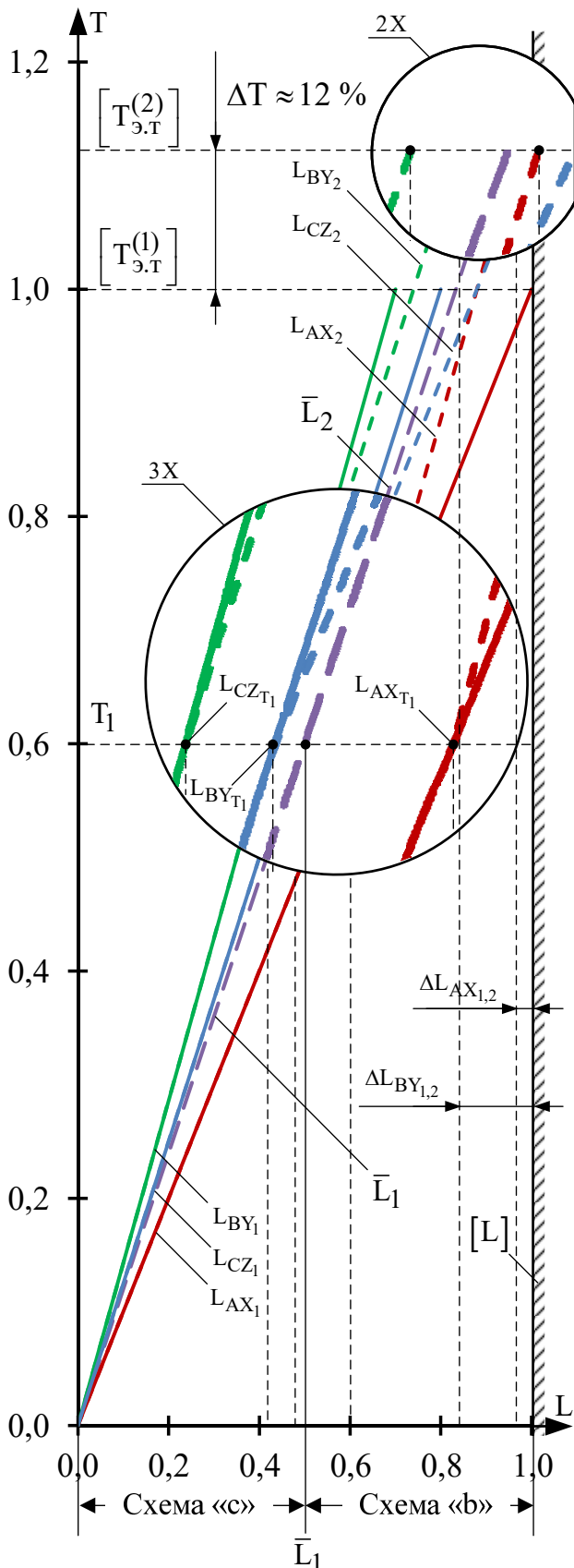


Рис. 8. Зависимость срока эксплуатации от износа изоляции обмоток при двух схемах подключения трансформатора

$$\bar{L}_j = \frac{L_{AX_j} + L_{BY_j} + L_{CZ_j}}{3}. \quad (10)$$

Для заданного количества схем подключения трансформатора n переход к новой схеме $j+1$ выполняется по условию

$$\bar{L}_j \geq j \cdot \frac{[L]}{n}, \quad (11)$$

где n – количество схем подключения трансформатора; j – порядковый номер текущей схемы подключения трансформатора.

Продление срока эксплуатации трансформатора в рассматриваемой схеме (см. рис. 1) выполним посредством снижения интенсивности износа изоляции обмотки АХ за счет подключения трансформатора по двум схемам в пределах $[T_{\text{э.т}}^{(2)}]$ представлено на рис. 8.

Снижение интенсивности износа изоляции обмотки АХ во второй схеме подключения трансформатора обеспечено схемой «б».

Критерием перехода от первой ко второй схеме подключения является средний износ изоляции обмоток трансформатора в первой схеме в соответствии с формулой (11). При $n = 2$ $\bar{L}_1 = 1/2[L]$.

Тренд зависимости срока эксплуатации трансформатора от износа изоляции обмоток высшего напряжения при двух схемах подключения представлен на рис. 8.

При подключении тягового трансформатора по двум схемам «с» и «б» срок его эксплуатации по износу изоляции обмоток ΔT увеличился на 12 % (для рассмотренного примера) в сравнении с одной схемой

подключения. При этом тяговый трансформатор выходит из строя при превышении 100 % износа изоляции обмотки CZ с остаточным ресурсом изоляции обмоток ВУ и АХ соответственно равным 0,17 и 0,08 о. е.

При двух схемах подключения срок эксплуатации трансформатора лимитирует износ изоляции обмотки CZ.

Подключение тягового трансформатора по трем схемам в пределах предельно допустимого времени эксплуатации трансформатора $[T_{э.т}^{(3)}]$ выполним по разработанному алгоритму.

Для расчетной схемы рис. 1 и условия $|\dot{I}_{II}| > |\dot{I}_{II}|$ при достижении $\bar{L}_{T_1} = 1/3[L]$ подключим тяговый трансформатор по второй схеме «b».

При достижении $\bar{L}_2 = 2/3[L]$ подключим трансформатор по третьей схеме «а».

Следовательно, при заданных условиях, подключение тягового трансформатора по трем схемам обеспечивает минимальную неравномерность износа изоляции обмоток АХ, ВУ и CZ к концу срока его эксплуатации (рис. 9):

$$L_{AX_{max}} = L_{BY_{max}} = L_{CZ_{max}} = [L] \quad (12)$$

Соотношение (12) соответствует максимальному времени эксплуатации трансформатора по износу изоляции обмоток. Срок эксплуатации трансформатора в сравнении с общепринятой схемой подключения увеличился на 20 % для принятых условий.

В четвертой главе рассмотрено решение задачи по продлению срока эксплуатации действующих тяговых трансформаторов при реконструкции

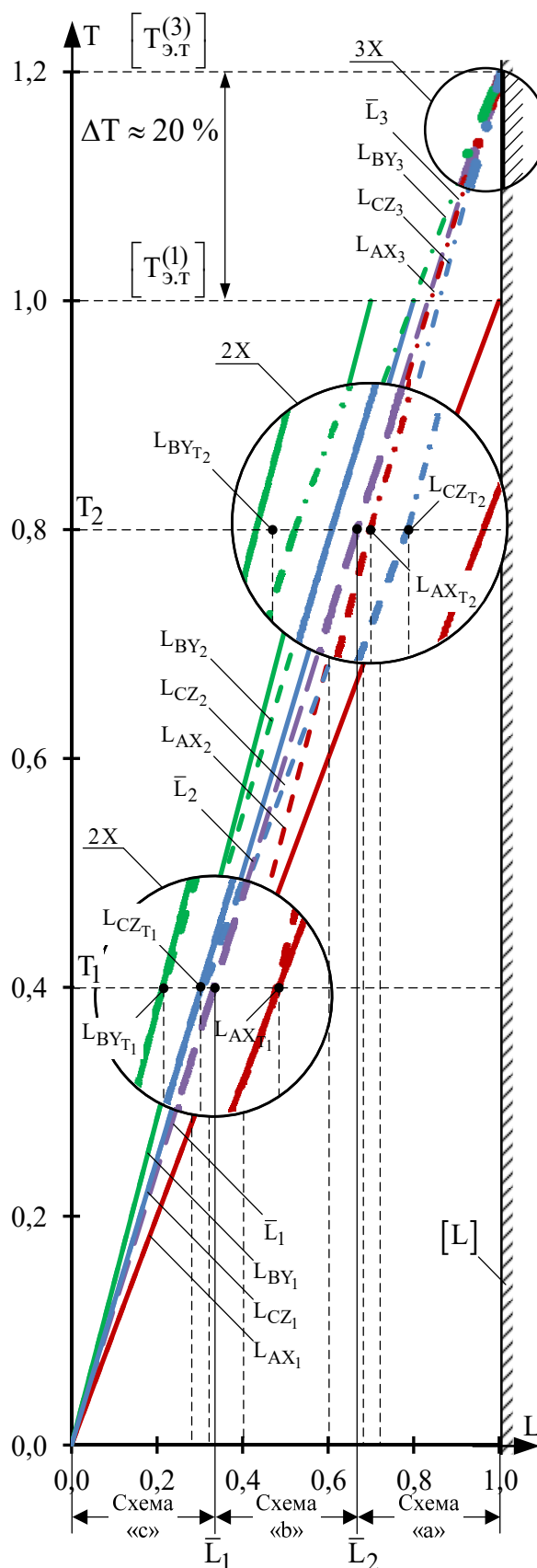


Рис. 9. Зависимость срока эксплуатации от износа изоляции обмоток при трех схемах подключения трансформатора

подстанций железных дорог переменного тока. Продление срока эксплуатации трансформаторов выполнено на примере участка Дальневосточной железной дороги (ДВостЖД).

Согласно результатам испытаний, выполненных в хозяйстве электроснабжения ДВостЖД в третьем квартале 2015 года, тяговые трансформаторы, установленные на включенных в план реконструкции подстанций, находятся в работоспособном состоянии. Срок их эксплуатации превышает полный срок службы и составляет: для трансформаторов подстанции № 1 – 33 года, подстанций № 2; 3 – 35 лет. При этом трансформаторы за 2013–2015 годы перерабатывали от 98 до 133 ГВт·ч/год электрической энергии на тягу поездов со значительными получасовыми максимумами нагрузки. Трансформаторы находятся в зоне риска по износу изоляции обмоток. Применение для них разработанных мероприятий увеличения срока эксплуатации по износу изоляции обмоток является актуальной задачей.

Схема подключения тяговых трансформаторов рассматриваемых подстанций изображена на рис. 10.

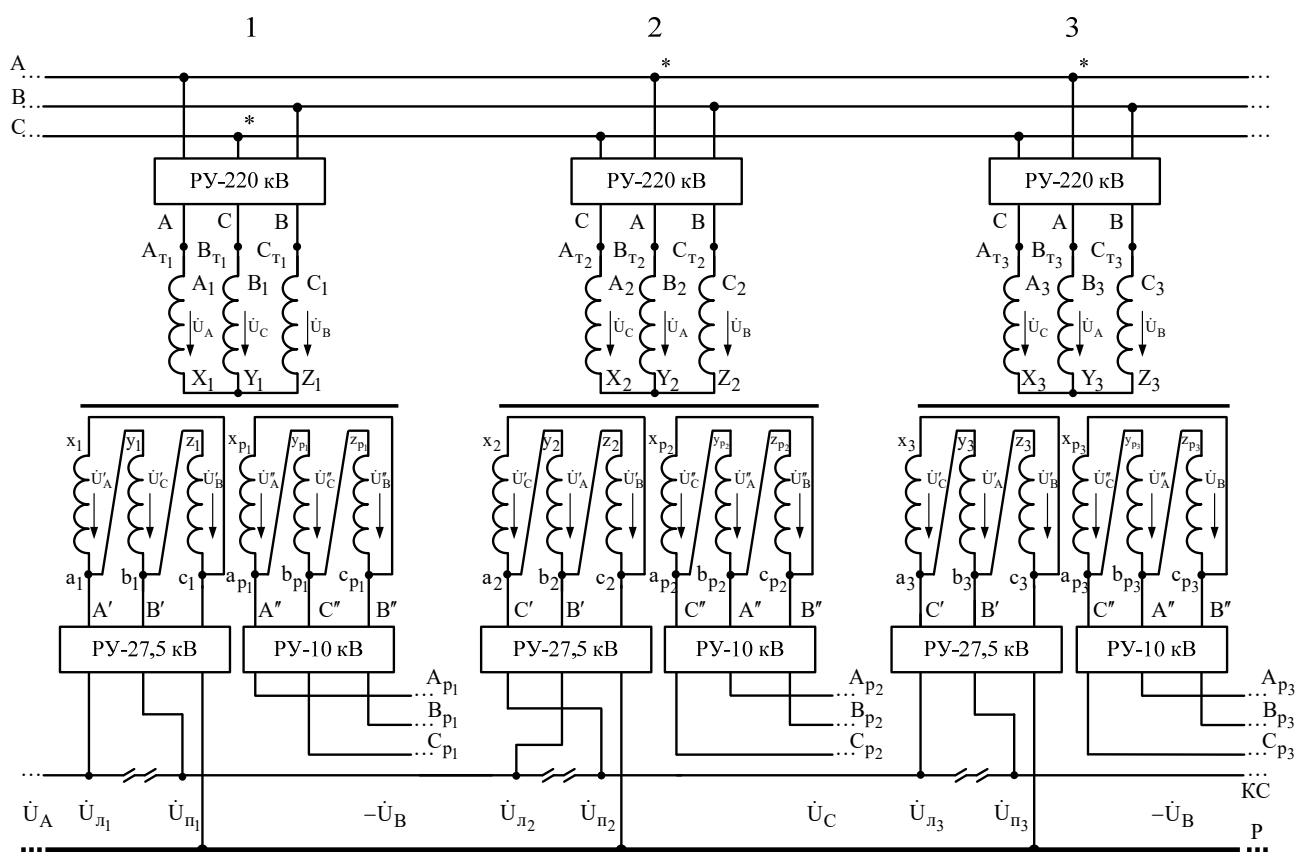


Рис. 10. Исходная схема подключения тяговых трансформаторов

Продление срока эксплуатации действующих тяговых трансформаторов при реконструкции подстанций участка ДВостЖД выполнено по способам и алгоритмам, представленным во второй и третьей главе диссертации.

На основе результатов распределения электрической энергии тяговых

нагрузок по обмоткам трансформаторов определены обмотки с наибольшим износом изоляции. Износ изоляции обмоток тяговых трансформаторов подстанций под номерами 1, 2 и 3 соответствует соотношениям:

$$L_{CZ_1} > L_{AX_1} > L_{BY_1}, L_{AX_2} > L_{CZ_2} > L_{BY_2}, L_{CZ_3} > L_{AX_3} > L_{BY_3}. \quad (13)$$

Новые схемы подключения тяговых трансформаторов определены по разработанному алгоритму выбора схем и присоединения вводов к распределительным устройствам подстанций. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 11. Содержание блоков алгоритма приведено в табл. 1.

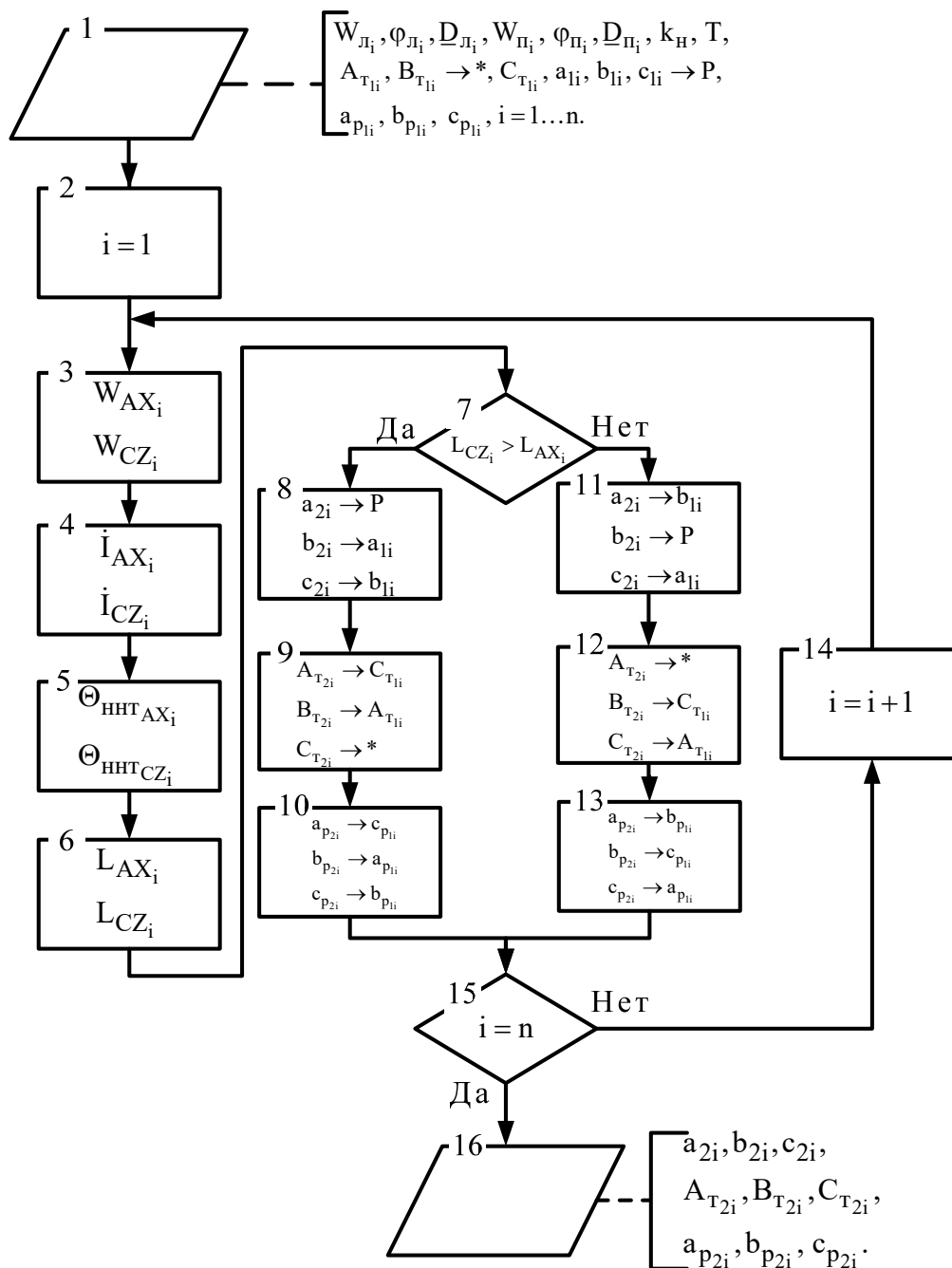


Рис. 11. Блок-схема алгоритма выбора схем и присоединения вводов тяговых трансформаторов к распределительным устройствам

Таблица 1 – Содержание блок-схемы алгоритма выбора схемы и присоединения вводов тягового трансформатора

Номер блока	Содержание блока
1	Исходные данные: расход электрической энергии левого $W_{лi}$ и правого $W_{пi}$ плеч питания подстанции; фазовый угол тока левого $\varphi_{лi}$ и правого $\varphi_{пi}$ плеча; оператор поворота напряжения левого $\underline{D}_{лi}$ и правого $\underline{D}_{пi}$ плеча питания подстанции, коэффициент нагрузки k_n ; расчетный период T ; присоединение в схеме 1 вводов $A_{T_{1i}}$ и $C_{T_{1i}}$ обмоток высшего напряжения к фазам ЛЭП, ввода $B_{T_{1i}}$ к наименее загруженной фазе ЛЭП ($B_{T_{1i}} \rightarrow *$), вводов a_{1i} и b_{1i} тяговых обмоток присоединены к контактной сети левого и правого плеча, ввода c_{1i} к рельсовой сети ($c_{1i} \rightarrow P$) и вводов $a_{p_{1i}}$, $b_{p_{1i}}$ и $c_{p_{1i}}$ обмоток районной нагрузки к фазам районной сети; количество тяговых подстанций от 1 до n ($i = 1 \dots n$)
2	Выбор первой подстанции
3	Расчет распределения среднегодовой электрической энергии тяговых нагрузок по обмоткам АХ и СЗ
4	Расчет тока обмоток АХ и СЗ
5	Определение температуры наиболее нагретой точки обмотки АХ ($\Theta_{\text{ннтАХ}}$) и СЗ ($\Theta_{\text{ннтСЗ}}$) тягового трансформатора
6	Определение износа изоляции обмоток АХ и СЗ
7	Определение обмотки с максимальным износом изоляции
8 (11)	В схеме 2 присоединить вводы a_{2i} , b_{2i} и c_{2i} к тяговой сети транспозицией соединителей соответствующих вводов трансформатора и РУ-27,5 кВ
9 (12)	В схеме 2 присоединить вводы $A_{T_{2i}}$, $B_{T_{2i}}$ и $C_{T_{2i}}$ к фазам ЛЭП транспозицией соединителей соответствующих вводов трансформатора и РУ-220 кВ
10 (13)	В схеме 2 присоединить вводы $a_{p_{2i}}$, $b_{p_{2i}}$ и $c_{p_{2i}}$ к фазам районной сети транспозицией соединителей соответствующих вводов трансформатора и РУ-10 кВ
14	Переход к следующей тяговой подстанции
15	Сравнение номера тяговой подстанции с заданным количеством подстанций n
16	Вывод данных о присоединениях вводов a_{2i}, b_{2i}, c_{2i} , $A_{T_{2i}}, B_{T_{2i}}, C_{T_{2i}}$, $a_{p_{2i}}, b_{p_{2i}}$ и $c_{p_{2i}}$ трансформатора подстанции i к фазам ЛЭП, тяговой и районной сети по второй схеме подключения «а» или «б»

Варианты существующих и предлагаемых присоединений вводов тяговых трансформаторов представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Варианты присоединения вводов тяговых трансформаторов

Номер подстанции	Наименование напряжения плеч		Присоединение вводов обмоток					
			тяговых			высшего напряжения		
	Левое	Правое	а	б	с	А _т	В _т	С _т
1	\dot{U}_A/\dot{U}_A	\dot{U}_B/\dot{U}_B	Л/Р	П/Л	Р/П	А/В	С/А	В/С
2	\dot{U}_B/\dot{U}_B	\dot{U}_C/\dot{U}_C	П/Л	Л/Р	Р/П	С/А	А/В	В/С
3	\dot{U}_C/\dot{U}_C	\dot{U}_B/\dot{U}_B	Л/Р	П/Л	Р/П	С/В	А/С	В/А

Примечание. Варианты присоединения – существующий/предлагаемый; Р – рельс; Л и П – левое и правое плечо

Присоединение вводов тяговых трансформаторов к распределительным устройствам подстанций по новым схемам показано на рис. 12.

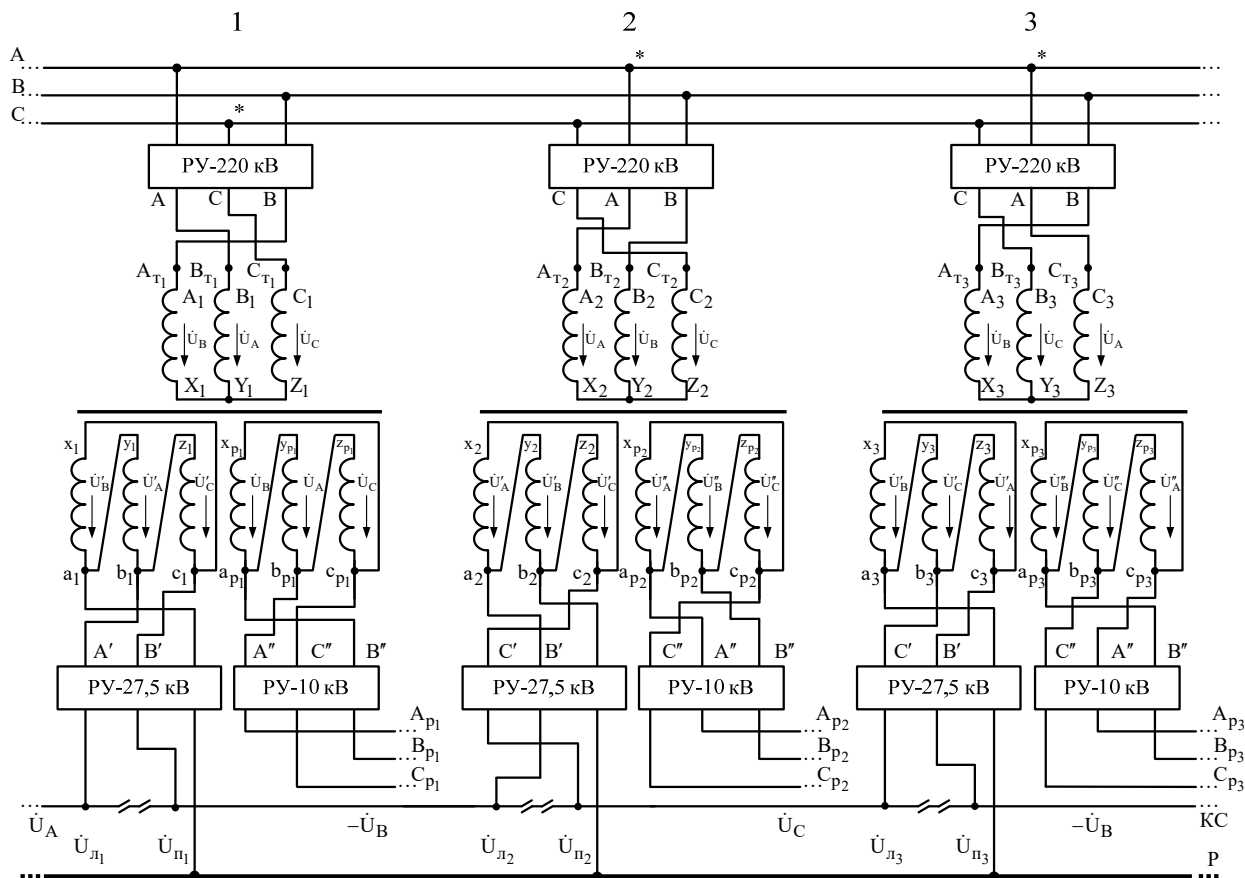


Рис. 12. Новая схема подключения тяговых трансформаторов

Подключение действующих тяговых трансформаторов по новым схемам позволяет продлить срок их эксплуатации по износу изоляции обмоток на 6 %. Оценка экономической эффективности новых схем подключения тяговых трансформаторов показала, что условно-годовая экономия приведенных затрат на эксплуатацию трансформатора типа ТДТНЖ-40000/220/27,5/10 составляет, с учетом его отказа по износу изоляции обмоток, около 340 тыс. руб./год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе результатов анализа распределения тока в обмотках тяговых трансформаторов подстанций системы электроснабжения железных дорог переменного тока 25 кВ установлена неравномерность износа изоляции обмоток.

2. Предложен способ пофазного учета износа изоляции обмоток тяговых трансформаторов, который позволяет определять интенсивность и неравномерность износа. Полученные результаты интенсивности и неравномерности износа являются основой при разработке мероприятий, направленных на продление срока эксплуатации трансформатора.

3. Разработан способ подключения тяговых трансформаторов к распределительным устройствам подстанций для снижения интенсивности износа изоляции обмоток AX и CZ трансформатора.

4. Разработан алгоритм выбора новых схем подключения тяговых трансформаторов для продления срока их эксплуатации за счет снижения неравномерности износа. Выбор новых схем выполнен на основе дополненной системы электроснабжения железных дорог переменного тока 25 кВ устройством контроля износа изоляции обмоток тяговых трансформаторов.

5. Разработан алгоритм выбора схем питания тяговой сети для снижения интенсивности износа изоляции обмоток тяговых трансформаторов за счет ограничения транзита мощности по подстанции.

6. Дополнена система тягового электроснабжения устройством для снижения интенсивности износа изоляции обмоток трансформатора, осуществляющим автоматический переход к схеме одностороннего или двустороннего питания тяговой сети.

7. Разработана методика выбора схем подключения действующих тяговых трансформаторов при реконструкции подстанций. На основе методики выполнен выбор схем подключения тяговых трансформаторов участка ДВостЖД. Определено, что срок эксплуатации тяговых трансформаторов по износу изоляции обмоток увеличился на 6 % относительно срока эксплуатации при общепринятой схеме подключения. При этом условно-годовая экономия приведенных затрат на эксплуатацию трансформатора типа ТДТНЖ-40000/220/27,5/10 составляет около 340 тыс. руб./год.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статья, входящая в международную систему цитирования Scopus

1. 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 – Москва : Знак, 2016. – № 2 – С. 45–49 (05.09.00 – электротехника).

Статьи в журналах, определенных перечнем ВАК РФ

2. Воприков, А. В. Продление срока эксплуатации силовых трансформаторов при реконструкции тяговых подстанций переменного тока железных дорог / А. В. Воприков // Электроника и электрооборудование транспорта – Москва : ГУП МО «Коломенская типография», 2016. – № 4 – С. 32–35 (05.09.00 – электротехника)

3. Григорьев, Н. П. Ресурсосбережение тяговых трансформаторов подстанций схемой подключения к тяговой сети переменного тока 25 кВ [Текст] / Н. П. Григорьев, А. В. Воприков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование – Иркутск : ООО Типография Иркут, 2014. – № 3 – С. 190–194 (05.22.00 – транспорт).

4. Григорьев, Н. П. Выбор схем подключения силовых трансформаторов тяговых подстанций электрифицированных железных дорог переменного

тока 25 кВ [Текст] / Н. П. Григорьев, А. В. Воприков // Вест. Ростовского гос. ун-та путей сообщ. – Ростов-на-Дону : D&V, 2014. – № 4 – С. 90–97 (05.22.00 – транспорт).

5. Григорьев, Н. П. Повышение ресурса обмоток тяговых трансформаторов подстанций переменного тока 25 кВ выбором схем питания тяговой сети [Текст] / Н. П. Григорьев, А. В. Воприков, А. П. Парфианович // Наука и техника транспорта – Москва : ИИО ИМУ РОАТ МГУПС, 2015. – № 1 – С. 109–113 (05.22.00 – транспорт).

Патенты

6. Способ подключения тяговых трансформаторов в системе переменного тока 25 кВ [Текст] : пат. 2540685 Рос. Федерация : МПК В60М 3/02, Н02J 3/00 (2006.01) / Н. П. Григорьев, А. В. Воприков ; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО ДВГУПС – № 2013135890/11 : заявл. 30.07.2013 ; опубл. 10.02.2015.

7. Система электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ [Текст] : пат. 2550582 Рос. Федерация : МПК В60М 3/02, Н02J 3/00 (2006.01) / Н. П. Григорьев, А. В. Воприков, М. С. Клыков ; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО ДВГУПС – № 2013149577/11 : заявл. 06.11.2013 ; опубл. 10.05.2015.

8. Система электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ [Текст] : пат. 2552572 Рос. Федерация : МПК В60М 3/02, Н02J 3/00 (2006.01) / Н. П. Григорьев, А. В. Воприков ; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО ДВГУПС – № 2014107628/11 : заявл. 27.02.2014 ; опубл. 10.06.2015.

Прочие публикации

9. Григорьев, Н. П. Схемы подключения силовых трансформаторов электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ [Текст] / Н. П. Григорьев, А. В. Воприков // Труды Всерос. науч.-практ. конф. (г. Хабаровск, 25–27 сентября 2013 г.) – Хабаровск. : Изд-во ДВГУПС, 2013. – С. 172–179.

10. Воприков, А. В. Увеличение ресурса устройства регулирования напряжения тяговых трансформаторов электрифицированных железных дорог 25 кВ 50 Гц [Текст] / А. В. Воприков, Н. П. Григорьев // Тезисы докладов Седьмого международного симпозиума Eltrans'2013. – Санкт-Петербург : Изд-во ПГУПС, 2013. – С. 26.

11. Воприков, А. В. Повышение срока службы тяговых трансформаторов подстанций схемой подключения к тяговой сети переменного тока 25 кВ [Текст] / А. В. Воприков, Н. П. Григорьев // Труды Всерос. науч.-практ. конф. творческой молодежи с международным участием. В 2 т. Т. 1 – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2014 – С. 52–58.

12. Григорьев, Н. П. Повышение перегрузочной способности силовых трансформаторов при реконструкции тяговых подстанций переменного тока 25 кВ [Текст] / Н. П. Григорьев, А. В. Воприков, С. Г. Ильин // Повышение эффективности транспортной системы региона: проблемы и перспективы : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием В 3 т. Т 3 ; под ред. С. М. Гончарука – Хабаровск.: Изд-во ДВГУПС, 2015. – С. 54–62.