

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологиче-
ский университет «МИСИС»**

Тихонов Алексей Валерьевич

Обоснование и разработка научно-технических решений по ограниче-
нию коммутационных перенапряжений для повышения эффективности
функционирования систем электроснабжения 10 кВ предприятий по про-
изводству алюминия

2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
Ляхомский Александр Валентинович

Москва, 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При производстве алюминия используется технология электролиза, питаемая от мощных преобразовательных агрегатов, являющихся частью системы электроснабжения алюминиевых заводов. Особенностью схемы питания электролизеров является наличие нескольких преобразовательных трансформаторов, преобразовательных тиристорных агрегатов, количество которых зависит от количества преобразовательных трансформаторов, шинных разъединителей, кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена и жесткой ошиновки.

Схема электроснабжения электролизеров характеризуется высокоамперной нагрузкой с плавным регулированием тока. Из-за высокой мощности и компактного размещения оборудования возникают значительно высокие токи короткого замыкания. Плавное регулирование позволяет равномерно распределять нагрузку по преобразовательным тиристорным агрегатам, но не позволяет снизить коммутационные перенапряжения (КП).

Коммутация тиристорных преобразовательных агрегатов, состоящих из силовых трансформаторов и мощных выпрямительных устройств, совершается быстродействующими вакуумными и элегазовыми выключателями. Коммутация указанных трансформаторов сопровождается появлением перенапряжений, величина которых может в два и более раза превышать номинальное напряжение сети.

Перенапряжения указанной величины вызывают риск аварийного пробоя изоляции обмоток преобразовательного трансформатора. Данное утверждение основано на изучении сетей 10 кВ предприятий электролизного производства при возникновении дефектов.

Изученные дефекты [17, 19, 21, 49, 51, 87, 99, 101, 103] дают полагать, что в начальный момент замыканий одной фазы на землю (ОЗЗ) в сетях 10 кВ КП составляют от 22% до 25% от общей аварийности СЭС 10 кВ; при возникновении коротких замыканий (КЗ) КП составляют 64%. Частая коммутация силовых преобразовательных трансформаторов создаёт условия для более

интенсивного старения изоляции, сокращает срок эксплуатации преобразовательных трансформаторов из-за пробоев изоляции.

Эксплуатация сетей 10 кВ предприятий алюминиевой отрасли при замене масляных выключателей на выключатели элегазовые и вакуумные, впервые столкнулась с проблемой надежности изоляции трансформаторов выпрямительных агрегатов в момент их отключения и включения. С появлением современной коммутационной аппаратуры вопросы сохранения целостности и долговечности изоляции трансформаторов стали рассматриваться с повышенным вниманием, поскольку быстродействующие вакуумные и элегазовые выключатели, способствуют возникновению коммутационных перенапряжений.

Основным техническим решением ограничения КП является применение ограничителей перенапряжений (ОПН). В настоящее время при развитии применения быстродействующих вакуумных и элегазовых выключателей длительность коммутационных импульсов сократилась. Это из-за инерционности ОПН привело к эффекту их «замирания», при котором происходит пропуск высокочастотных коммутационных импульсов [17].

Указанная инерционность ОПН привела к разработке устройств ограничения КП на основе RC-цепей: RC-гасителей, RC-ограничителей и гасителей-компенсаторов. Указанные устройства разрабатывались на основе исследований для защиты высоковольтных синхронных и асинхронных электродвигателей.

Применение RC-цепей для защиты преобразовательных трансформаторов до настоящего времени практически не исследовалось. В тоже время применение ОПН для защиты преобразовательных трансформаторов от перенапряжений не решает задачу их эффективной защиты, так как аварийность преобразовательных трансформаторов с увеличением доли быстродействующих выключателей (вакуумных и элегазовых) привело к росту пробоя их изоляции.

В связи с этим, исследования коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов для разработки технических решений и создания устройств эффективного ограничения коммутационных перенапряжений

являются актуальными для снижения аварийности и повышения эффективности функционирования СЭС 10 кВ предприятий по производству алюминия.

Цель работы: Исследование режимов коммутационных перенапряжений с обоснованием и разработкой технических решений по эффективному ограничению КП преобразовательных трансформаторов для снижения аварийности и повышения эффективности функционирования СЭС 10 кВ предприятий по производству алюминия.

Идея работы. Повышение эффективности функционирования СЭС 10 кВ предприятий по производству алюминия возможно путем обоснования, разработки и внедрения технических решений по ограничению коммутационных перенапряжений.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Провести анализ состояния вопроса коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов в СЭС 10 кВ предприятий по производству алюминия.
2. Разработать методику экспериментальных исследований режимов коммутационных перенапряжений в электрических сетях 10 кВ предприятий по производству алюминия.
3. Провести экспериментальные исследования режимов коммутационных перенапряжений в электрических сетях 10 кВ в условиях предприятий по производству алюминия.
4. Установить зависимости коммутационных перенапряжений от показателей режимов коммутации.
5. Провести физическое моделирование на полунатурной установке режимов коммутационных перенапряжений в электрических сетях без применения средств защиты от перенапряжений и с применением средств защиты от перенапряжений.

Объект исследования: система электроснабжения 10 кВ электролизного производства алюминия.

Предмет исследования: режимы коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов, питающих процесс электролиза алюминия.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались апробированные методы теории электроснабжения промышленных предприятий, электрических машин, математической статистики и математического моделирования. При анализе экспериментальных данных применялись методы Граббса и Ван-дер-Вардена.

Научная новизна диссертационной работы заключается в: установлении влияния коэффициента загрузки быстродействующих выключателей, суммарного коэффициента гармонических составляющих тока нагрузки преобразовательных трансформаторов на коммутационные перенапряжения; получении эмпирических зависимостей кратности коммутационных перенапряжений от угла коммутации вакуумных и элегазовых выключателей и коэффициентов их загрузки; научно-техническом обосновании решений для создания средств эффективного ограничения коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов электролизного производства.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в установлении влияния коэффициента загрузки быстродействующих выключателей, суммарного коэффициента гармонических составляющих, тока нагрузки на коммутационные перенапряжения.

Практическая значимость результатов работы заключается в: получении на основе экспериментальных исследований оценок показателей режимов коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов; разработке технического решения и схемы устройства для эффективного ограничения коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов.

Реализация полученных результатов. Результаты работы: использованы при разработке усовершенствованной схемы гасителя-компенсатора и приняты к производству в ООО «Научно-Производственное Предприятие

«РУТАС», которое занимается промышленным выпуском РС-гасителей и гасителей-компенсаторов; внедрены и применяются в ООО «Инжиниринг Строительство Обслуживание», отвечающего за техническую эксплуатацию, ремонты и модернизацию систем электроснабжения и электрооборудования предприятий АО «РУСАЛ».

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждается достаточной (на уровне 0,95) сходимостью результатов аналитических и экспериментальных исследований коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов предприятий АО «РУСАЛ Саяногорск» и АО «РУСАЛ Новокузнецк», а также положительным опытом применения усовершенствованных гасителей-компенсаторов ГК(М)-10,5/0,75-УХЛ1.

На защиту выносятся:

1. Установленные зависимости перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов от их нагрузки и коэффициента загрузки быстродействующих выключателей, позволяющие оценить влияние этих показателей на кратность коммутационных перенапряжений.
2. Зависимости кратности коммутационных перенапряжений от угла прерывания электрической дуги между контактами быстродействующих выключателей и коэффициента их загрузки, позволяющие обосновать ток нагрузки преобразовательного трансформатора, при котором исключаются возникновение опасных коммутационных перенапряжений.
3. Научно-техническое обоснование технического решения для создания средств защиты эффективного ограничения коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов.

Апробация работы. Основные результаты и выводы диссертационного исследования докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: Международном научном симпозиуме НЕДЕЛЯ

ГОРНЯКА 2022, 2023 (г. Москва) XVI Международной научно-практической конференции (г. Уфа).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 4 печатных работы, из которых 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Основной текст диссертационной работы изложен на 117 страницах, содержит 30 рисунков и 35 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, даётся общая характеристика работы, сформулированы цели и задачи исследований, показана научная новизна, сформулированы основные положения работы, выносимые на защиту, практическая значимость и отражены вопросы реализации и апробации научных результатов.

В первой главе «СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 10 КВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ» проведен анализ исследований перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов (ПРТР) в системах электроснабжения 10 кВ предприятий алюминиевой промышленности. Отмечаются особенности систем обеспечения электрической энергией: высокие токи короткого замыкания, значительные искажения качества электроэнергии из-за мощных выпрямителей, а также ускоренное старение изоляции оборудования из-за воздействия высших гармоник. Приводится статистика аварийности за 2006 – 2024 гг. (рис. 1), показывающая, что основное влияние на причины аварийности являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) и короткие замыкания и ввод в эксплуатацию вакуумных и элегазовых выключателей.

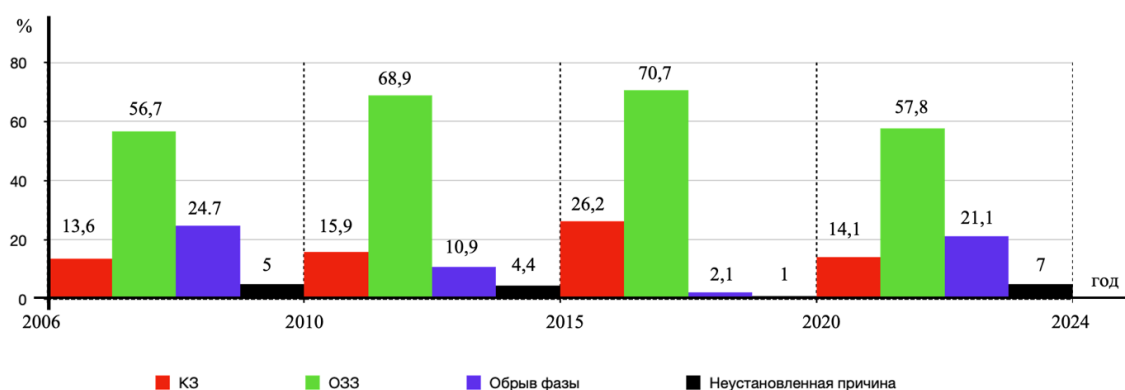


Рисунок 1 - Процентное распределение КЗ, ОЗЗ и обрыв фаз в распределительных сетях 10 кВ по пятилетним периодам с 2006 по 2024 гг.

Анализ состояния вопроса коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 10 кВ показывает, что исследование коммутационных перенапряжений в электрических сетях 10 кВ предприятий по производству алюминия является актуальным вопросом.

Во второй главе «МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЖИМОВ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕТЯХ 10 КВ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ АЛЮМИНИЯ» разработана методика экспериментального исследования коммутационных перенапряжений в электрических сетях 10 кВ предприятий по производству алюминия.

Методика экспериментальных исследований режимов коммутационных перенапряжений включает: экспериментальные измерения показателей режимов коммутационных перенапряжений при включении, отключении преобразовательных трансформаторов под нагрузкой и в режиме холостого хода; обработку данных показателей режимов коммутационных перенапряжений; моделирование режимов коммутационных перенапряжений на полунатурной физической установке; анализ экспериментальных данных.

Обработка экспериментальных данных по коммутационным перенапряжениям содержит:

- 1) Получение исходных данных, включающих значения: тока нагрузки ПРТР ($I_{нагр}$), суммарного коэффициента гармонического состава тока (K_I), коммутационных перенапряжений ($U_{п}$), коэффициента загрузки преобразовательного трансформатора ($K_{з.тр}$) и выключателя ($K_{з.в}$) по току.
- 2) Определение статистических показателей коммутационных перенапряжений: среднего, дисперсии, среднеквадратического отклонения, коэффициента вариации.
- 3) Формирование статистических выборок коммутационных перенапряжений и их очищение от «выбросов» по критерию Граббса.

- 4) Проверку статистических выборок коммутационных перенапряжений на однородность с определением их принадлежности к генеральной совокупности по критерию Ван-дер-Вардена.

Анализ экспериментальных данных – расчетных показателей, осциллограмм коммутационных перенапряжений и гармонического состава тока нагрузки ПРТР выполнен в три этапа.

На первом этапе определяется кратность коммутационных перенапряжений в соответствии с выражением:

$$K_{\Pi} = \frac{U_{max}}{U_{н}}, \quad (1)$$

где U_{max} - максимальное мгновенное значение напряжения, зафиксированное при коммутации преобразовательного трансформатора, кВ;

$U_{н}$ - номинальное напряжение сети, кВ.

На втором этапе определяются зависимости КП от тока нагрузки ПРТР ($I_{нагр}$) и коэффициента загрузки выключателя ($K_{з.в}$):

$$K_{\Pi} = f_1(I_{нагр}), \quad (2)$$

$$K_{\Pi} = f_2(K_{з.в}), \quad (3)$$

На третьем этапе определяется зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих тока K_I от тока нагрузки ПРТР:

$$K_I = f_3(I_{нагр}), \quad (4)$$

На основе вышеизложенных положений выполнено экспериментальное исследование и моделирование режимов коммутационных перенапряжений.

В третьей главе «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 10 КВ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ АЛЮМИНИЯ» приведено экспериментальное исследование коммутационных режимов преобразовательных трансформаторов, коммутируемых элегазовыми и вакуумными выключателями в сетях 10 кВ электролиза алюминия в условиях предприятий АО «РУСАЛ Саяногорск» и АО «РУСАЛ Новокузнецк». Исследования выполнены на распределительных

подстанциях (рис. 2) для токов электролиза 200 и 400 кА при диапазонах токов нагрузки преобразовательных трансформаторов (0,05–1,0) $I_{нагр}$. Исследования включали 1248 циклов коммутации с регистрацией коммутационных перенапряжений, токов нагрузки и их спектрального состава.

На основании статистической обработки экспериментальных данных по коммутационным перенапряжениям, выполненной в соответствии с положениями методики экспериментальных исследований (гл. 2), сформированы статистические выборки и определены статистические характеристики кратностей коммутационных перенапряжений ($K_{п}$) при включении, отключении ПРТР элегазовыми и вакуумными выключателями при токах электролиза 200 и 400 кА.

Анализ полученных данных показал, что максимальная кратность коммутационных перенапряжений при включении ПРТР элегазовым выключателем ($K_{п.маx}$) равна 3,1, при отключении ПРТР вакуумным выключателем максимальная кратность коммутационных перенапряжений равна 4,2.

Проверка на «выбросы» в статистических выборках кратностей коммутационных перенапряжений проводилась с применением критерия Граббса:

$$G_{max} = \frac{|K_{п.маx} - \bar{K}_{п}|}{\sigma}, \quad (5)$$

Результаты проверки показали, что статистические выборки коммутационных перенапряжений не имеют статистически значимых выбросов по первому приближению, так как значения G_{max} и G_{min} для всех выборок находятся ниже критического уровня $G_{кр} = 2,87$.

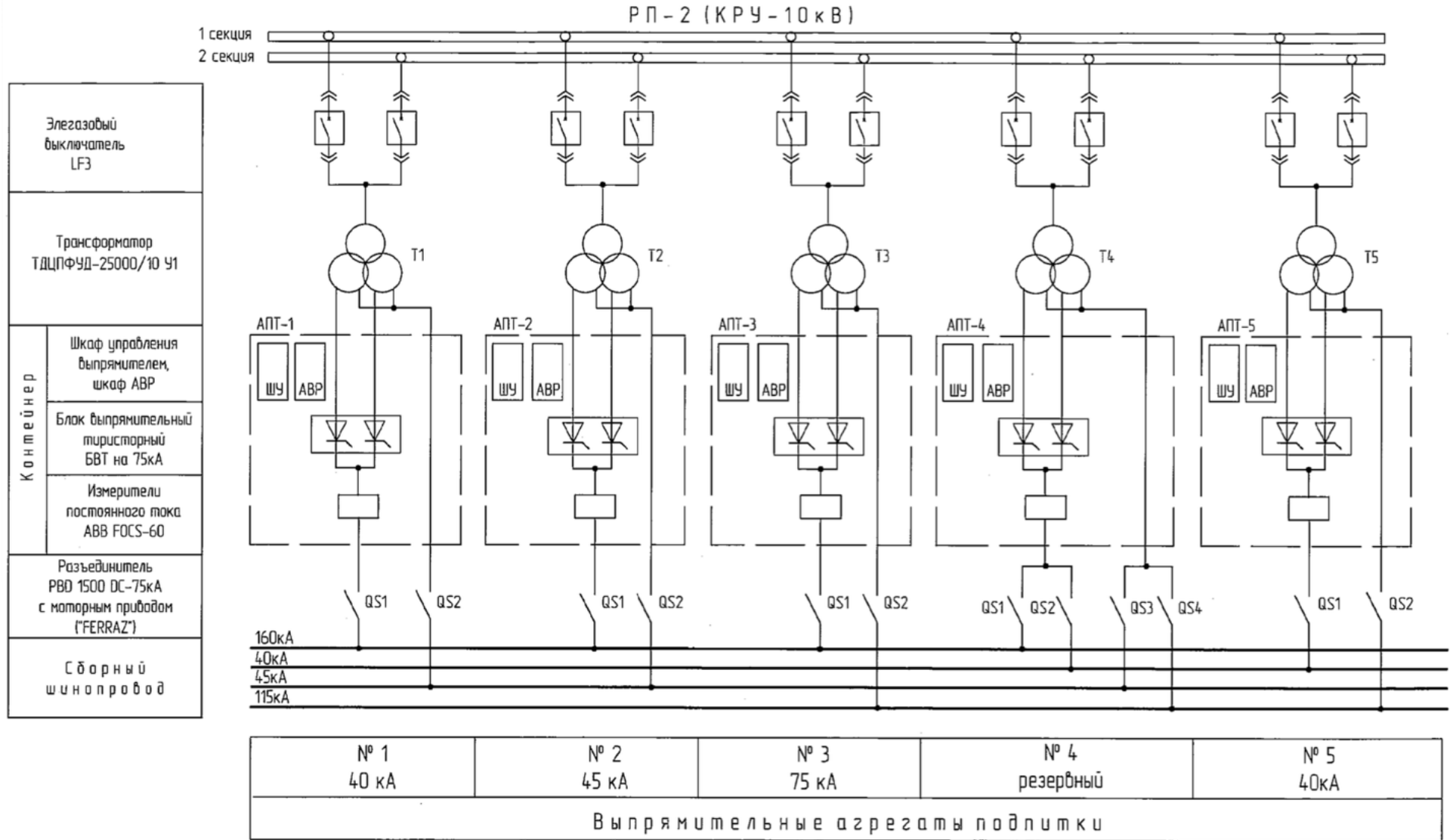


Рисунок 2 – Однолинейная схема электроснабжения электролизеров

Проверена гипотеза о принадлежности статистических выборок кратностей коммутационных перенапряжений к генеральной совокупности для предприятий АО «РУСАЛ Саяногорск» и АО «РУСАЛ Новокузнецк» с применением непараметрического критерия Ван-дер-Вардена:

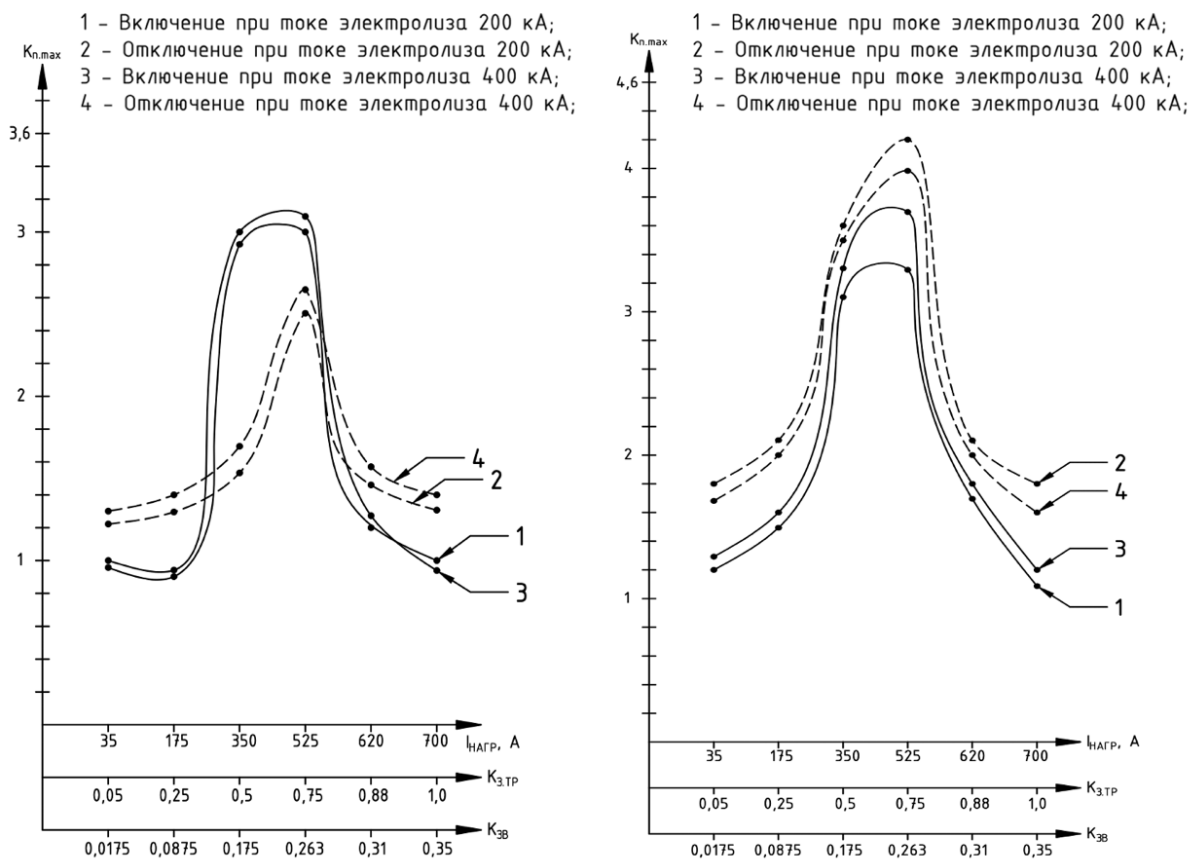
$$X_{\text{эмп}} = \sum_{i=1}^{n=2} \psi \left(\frac{R_i}{n_1 + n_2 + 1} \right), \quad (6)$$

Для этого было определено критическое значение:

$$X_{\text{кр}} = \chi_{k-1; 1-\alpha}^2 \quad (7)$$

Результаты проверки показали, что гипотеза о принадлежности статистических выборок кратностей коммутационных перенапряжений к генеральной совокупности отвергается, так как расчетные значения критерия Ван-дер-Вардена ($X_{\text{эмп}}$) для всех выборок больше критических значений ($X_{\text{кр}} = 3,84$).

Получены эмпирические зависимости максимальных кратностей коммутационных перенапряжений $K_{\text{п.мак}}$ от тока нагрузки ПРТР, коэффициентов загрузки ПРТР и выключателей при включении и отключении элегазовыми и вакуумными выключателями (рис 3). Установленные эмпирические зависимости показывают, что при увеличении тока нагрузки до значений, соответствующих коэффициенту загрузки преобразовательного трансформатора равного 0,75 и коэффициенту загрузки выключателя равного 0,26, кратность коммутационных перенапряжений возрастает для всех режимов при коммутации элегазовыми и вакуумными выключателями и достигает максимальных значений: $K_{\text{п.мак}} = 3,1 U_{\text{н}}$ при коммутации элегазовым выключателем и $K_{\text{п.мак}} = 4,2 U_{\text{н}}$ при коммутации вакуумным выключателем при токе нагрузки 525 А.



а)

б)

Рисунок 3 – Эмпирические зависимости максимальных значений кратностей коммутационных перенапряжений $K_{п.мах}$ от тока нагрузки ПРТР ($I_{нагр}$), коэффициента загрузки ПРТР $K_{з.тр}$ и коэффициента загрузки выключателя $K_{з.в}$ при коммутации ПРТР элегазовыми (а) и вакуумными (б) выключателями

При дальнейшем увеличении тока нагрузки коммутационные перенапряжения уменьшаются, что согласуется с физическими особенностями дугогашения в современных быстродействующих выключателях, которые заключаются в следующем: при больших токах уменьшается влияние среза тока: дуга гаснет ближе к естественному нулю, перенапряжения снижаются; с ростом тока дуга становится устойчивее, реже возникает преждевременное гашение и высокочастотные колебания; уменьшается вероятность повторных пробоев и перезажиганий, которые обычно дают максимальные перенапряжения.

Установлено, что опасные для изоляции обмоток ПРТР коммутационные перенапряжения формируются не только при отключении, но и при включении преобразовательных трансформаторов. Коммутационные перенапряжения при включении элегазовыми и вакуумными выключателями обусловлены отскоком контактов, приводящим к многократному прерыванию дуги и срезу тока, при этом величина коммутационных перенапряжений возрастает с увеличением числа отскоков контактов. Максимальное значение кратности перенапряжения при включении элегазовым выключателем достигает $3,1 U_n$, а при отключении вакуумным выключателем - $4,2 U_n$.

Выполнен сравнительный анализ влияния типа выключателя на уровни коммутационных перенапряжений с использованием коэффициента превышения кратностей коммутационных перенапряжений:

$$\gamma = \frac{K_{п.маxВ}}{K_{п.маxЭ}}, \quad (8)$$

где $K_{п.маxЭ}$ – кратность коммутационных перенапряжений для элегазового выключателя;

$K_{п.маxВ}$ – кратность коммутационных перенапряжений для вакуумного выключателя.

Показано, что применение вакуумных выключателей при коммутации преобразовательных трансформаторов приводит к формированию коммутационных перенапряжений, превышающих уровни перенапряжений при использовании элегазовых выключателей в среднем в 1,1– 2,2 раза. Это позволяет обосновать, что с позиции ограничения коммутационных перенапряжений более рациональным является применение элегазовых выключателей для коммутации преобразовательных трансформаторов в сетях 10 кВ.

Установлены зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих тока нагрузки от коэффициента загрузки преобразовательного трансформатора и кратности максимальных коммутационных перенапряжений от уровня гармонических искажений. Установлено, что наибольшая

генерация высших гармоник тока наблюдается при коэффициенте загрузки преобразовательного трансформатора в диапазоне $(0,15-0,5) S_{\text{ном}}$, когда суммарный коэффициент гармоник достигает 20–30 % и фиксируются максимальные значения коммутационных перенапряжений. При меньших $(0,05-0,15) S_{\text{ном}}$ и более высоких $(0,5-0,75) S_{\text{ном}}$ значениях нагрузки интенсивность генерации высших гармоник имеет средний уровень (10–20 %), а при коэффициенте загрузки свыше $0,75 S_{\text{ном}}$ наблюдается минимальная генерация гармоник. Полученные результаты показывают необходимость ограничения гармонических искажений с применением фильтрующих устройств для снижения уровней коммутационных перенапряжений в сетях 10 кВ электролизных производств.

В четвертой главе «ЗАВИСИМОСТИ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ОТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЖИМОВ КОММУТАЦИИ» выполнено математическое моделирование переходных процессов в системе «вакуумный выключатель – кабельная линия – преобразовательный трансформатор» при коммутации индуктивной нагрузки в сетях 10 кВ с учётом высших гармонических составляющих тока.

Обоснован выбор однофазной схемы замещения с сосредоточенными параметрами, эквивалентной схеме с распределёнными параметрами (рис 4). Приняты о квазипостоянстве напряжения сети в момент коммутации и пренебрежимо малых междуфазных и межвитковых ёмкостях. Параметры трансформатора заданы по результатам расчётов и натурных измерений.

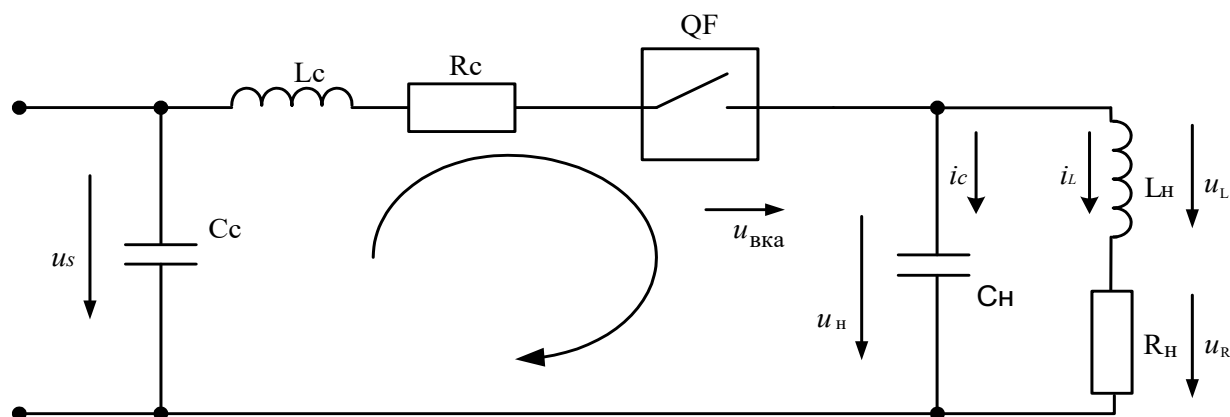


Рисунок 4 – Однофазная схема замещения системы «вакуумный выключатель – кабельная линия – преобразовательный трансформатор»

В результате моделирования получены аналитические выражения для тока и напряжения в RLC-контуре при срезе тока, а также реализована суперпозиция влияния основной и высших гармоник тока (5-й и 11-й).

Сопоставление результатов математического моделирования с экспериментальными данными показало расхождение по максимальным значениям кратности коммутационных перенапряжений не более чем 1,43 %, что подтверждает адекватность принятой модели.

На основании анализа гармонического состава токов нагрузки установлено, что в формирование суммарного коэффициента гармонических искажений тока при коммутации преобразовательного трансформатора наибольшее влияние оказывают высшие гармоники 5-го и 11-го порядков – их совокупный вклад в ток высших гармоник составляет до 84-98,5 %, что позволило рассматривать данные гармоники в качестве определяющих при оценке влияния несинусоидальности тока на уровни коммутационных перенапряжений.

Разработанная модель позволила исследовать влияние коэффициента загрузки выключателя и угла прерывания дуги на уровень коммутационных перенапряжений и выделить две характерные зоны углов коммутации:

1) При коэффициенте загрузки выключателя $K_{з.в} \leq 0,263$, что соответствует коэффициенту загрузки ПРТР $K_{з.тр} \leq 0,75$, максимальные значения кратности коммутационных перенапряжений формируются при углах коммутации φ_k в диапазоне 135-145°, что соответствует первой зоне рис 5. В этом диапазоне наличие 5-й и 11-й гармоник приводит к увеличению кратности перенапряжений в среднем в 1,2-1,3 раза и обуславливает возрастание коммутационных перенапряжений до $4 U_n$. Это существенно превышает допустимое значение перенапряжения, равного $2,8 U_n$ и создаёт риск пробоя изоляции обмоток трансформаторов.

2) При увеличении коэффициента загрузки выключателя свыше 0,263 угол коммутации φ_k смещается в диапазон 160-165°, что соответствует второй зоне рис 5. В этом диапазоне влияние 5-й и 11-й гармоник, приводит к снижению коммутационных перенапряжений (1,07 раза) до уровня (2,0-2,2) U_n , не

представляющих угрозы для аварийного пробоя изоляции обмоток трансформатора.

Установлено, что при увеличении коэффициента загрузки преобразовательного трансформатора до значения не менее 0,88 при $K_{з.в} \geq 0,31$ происходит смещение угла прерывания дуги во вторую зону рис.5 (φ_k находится в диапазоне 160-165°) и ограничение кратности коммутационных перенапряжений до значения $2,2 U_n$, независимо от наличия высших гармоник тока. Такой режим ограниченно реализуем с учётом требований устойчивости процесса электролиза. В этой связи исследована эффективность применения RC-гасителей различной ёмкости.

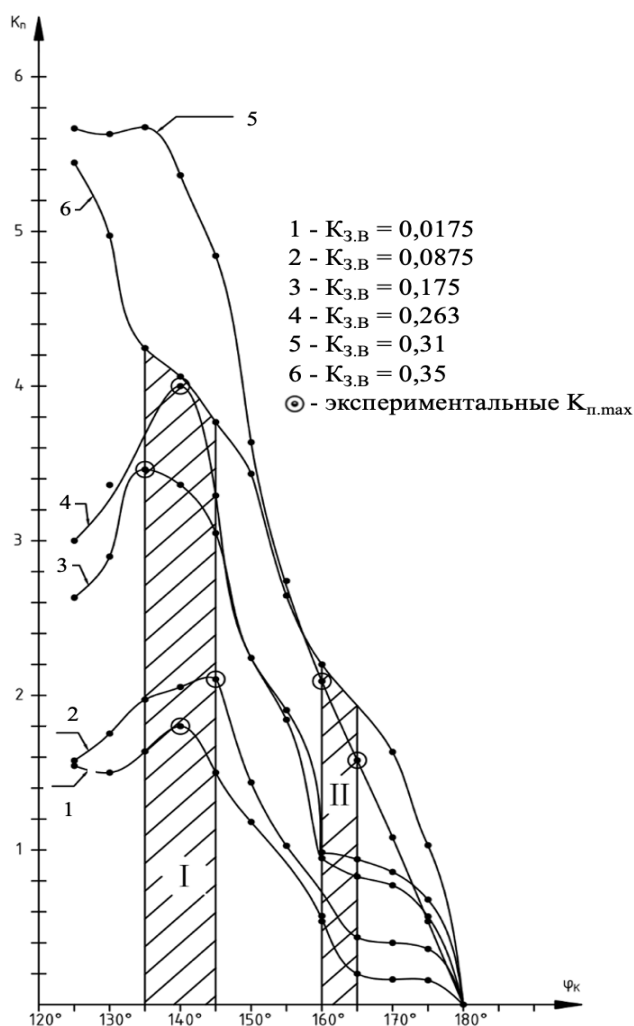


Рисунок 5 – Эмпирические зависимости кратности коммутационных перенапряжений $K_{п.мах}$ от угла коммутации φ_k и коэффициента загрузки выключателя. Первая зона (I): φ_k находится в диапазоне 135-145°, вторая зона (II): φ_k находится в диапазоне 160-165°

Доказано, что RC-цепи с параметрами $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 0,25 \text{ мкФ}$ не во всех режимах обеспечивают снижение кратности коммутационных перенапряжений ниже допустимого значения $2,8 U_H$ (при $K_{з.в} = 0,263$ и углах $135-140^\circ$ кратность остаётся на уровне $2,8-3,0$), тогда как применение RC-цепей с параметрами $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 0,75 \text{ мкФ}$ во всём исследованном диапазоне коэффициентов загрузки и углов коммутации ограничивает максимальную кратность коммутационных перенапряжений уровнем не выше $1,68 U_H$.

Полученные в ходе моделирования наглядные зависимости кратности коммутационных перенапряжений от угла коммутации и коэффициента загрузки выключателя при отсутствии средств защиты и при использовании RC-цепей представлены на рис. 6.

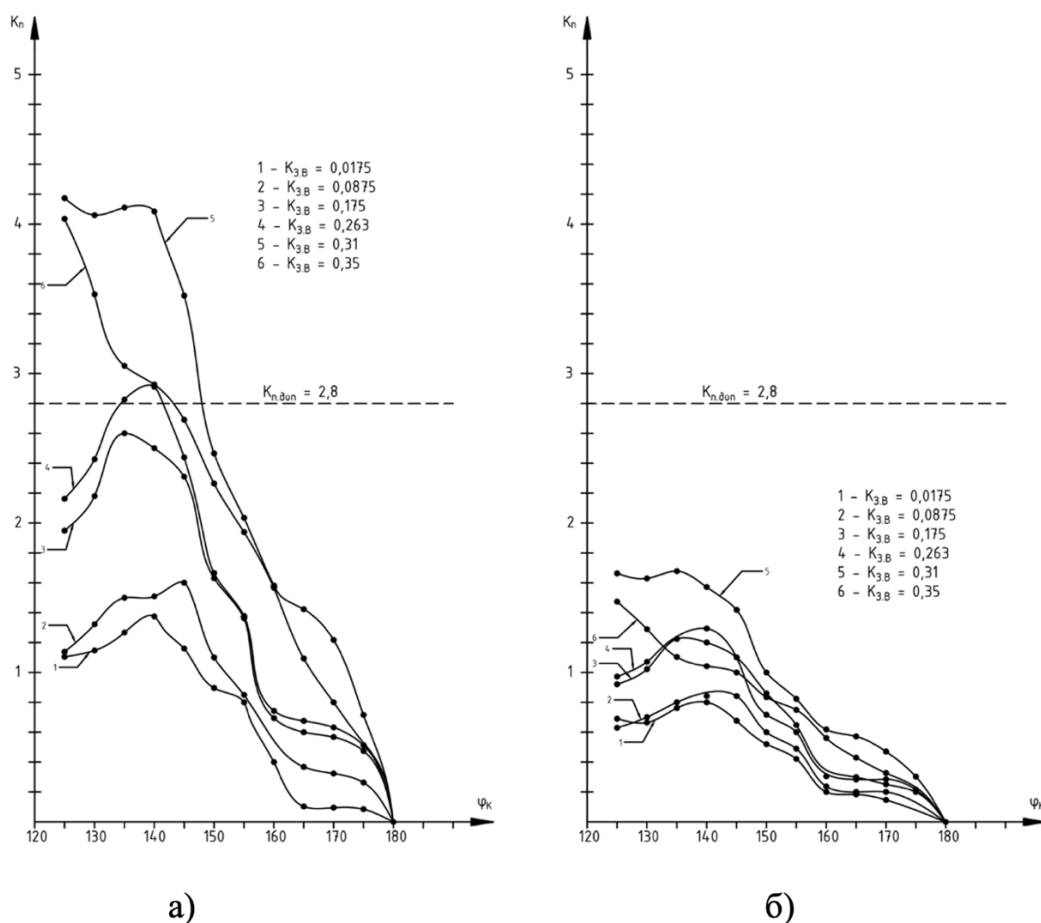


Рисунок 6 – Эмпирические зависимости кратности коммутационных перенапряжений $K_{п.мах}$ от угла коммутации φ_k и коэффициента загрузки выключателя $K_{з.в}$: а) без применения RC-цепей, б) с применением RC-цепей с параметрами $R = 30 \text{ Ом}$; $C = 0,75 \text{ мкФ}$

Указанные эмпирические зависимости позволяют количественно оценить влияние высших гармоник и параметров режимов коммутации на уровень перенапряжений для обоснования рационального выбора параметров RC-гасителей для эффективного ограничения коммутационных перенапряжений в преобразовательных трансформаторах.

В пятой главе «ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ СОЕДИНЕНИЯ RC-ЦЕПЕЙ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСТРОЙСТВА НА БАЗЕ RC-ЦЕПЕЙ» выполнено физическое моделирование схем соединения RC-цепей (рис. 7) с целью определения их эффективности по ограничению перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов. Приведены результаты опытной эксплуатации устройств на базе RC-цепей с рациональной схемой их соединений, позволяющей осуществлять наиболее эффективное ограничение перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов.

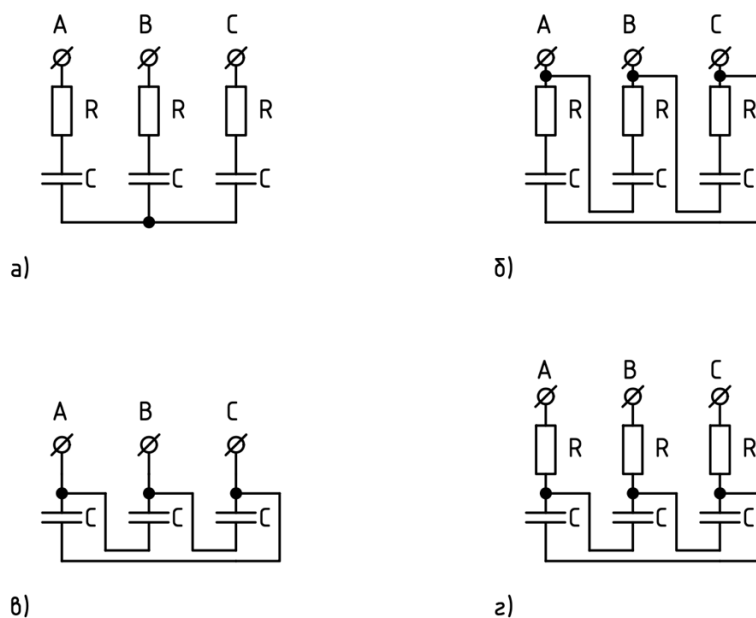


Рисунок 7 – Схемы соединения RC-цепей, собранной по схемам: а) звезда с изолированной нейтральной точкой; б) по схеме треугольник, в) конденсаторы по схеме треугольник, г) треугольник конденсаторов с последовательным включением резисторов в фазы А,В,С

Физическое моделирование предложенных электрических схем показало, наиболее эффективной схемой для ограничения перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов, является схема 7, г (рис. 7).

На основе вышеприведенной схемы разработано усовершенствованное устройство ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1.

Опытная эксплуатация устройства ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1 в условиях предприятий АО «РУСАЛ» подтвердила эффективность ограничения перенапряжений, возникающих при коммутации преобразовательных трансформаторов, кратность коммутационных перенапряжения не превышает значения свыше $1,5 U_n$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получено решение актуальной научно-технической задачи повышения эффективности функционирования систем электропитания 10 кВ предприятий по производству алюминия на основе ограничения коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов.

Основные научные выводы и решения, полученные автором, заключаются в следующем:

1. Анализе динамики причин аварийности в сетях 10 кВ предприятий по производству алюминия;
2. Разработке методических принципов исследования режимов коммутационных перенапряжений в сетях 10 кВ предприятий по производству алюминия;
3. Экспериментальных измерениях, обработки и анализе экспериментальных данных;
4. Физическом полунатурном моделировании режимов коммутационных перенапряжений;
5. Установлении эмпирических зависимостей кратности перенапряжений от параметров коммутационных режимов;

6. Научно-техническом обосновании и разработке схемных решений устройств эффективного ограничения коммутационных перенапряжений.

Внедрение основных результатов работы привело к следующим практическим эффектам:

- получена оценка показателей режимов коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов электролизного производства;
- разработано схемное решение по эффективному ограничению коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов;
- разработано и внедрено устройство по эффективному ограничению коммутационных перенапряжений преобразовательных трансформаторов ГК(М)-10,5-0,75-УХЛ1;
- исключение рисков аварийного пробоя изоляции преобразовательных трансформаторов;
- повышение эффективного функционирования систем электроснабжения 10 кВ предприятий по производству алюминия.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования связаны с элиминацией 5-й и 11-й гармоник в токе нагрузке преобразовательных трансформаторов, обеспечивающей лучшие условия эксплуатации изоляции для увеличения срока ее службы.

Основные положения диссертационного исследования изложены в следующих работах:

1. Пантелеев В.И., Кузьмин И.С., Завалов А.А., Тихонов А.В., Умецкая Е.В. Качество электрической энергии в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий России. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 3. С. 356–368. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-356-368>
2. Тихонов А.В. Исследование влияния параметров элегазовых выключателей на величину коммутационных перенапряжений на основе исследования номинальных режимов преобразовательных трансформаторов

// iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 489–503.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-489-503>. EDN: XCUWWH.

3. Кузьмин С.В., Тихонов А. В., Тихонов К. В. О влиянии диагностики внутренних дефектов преобразовательных трансформаторов на повышение надежности // Энергетик. – 2026. – № 2. DOI: 10.71527/EP.EN.2026.02.003