



КГУ

**«КАЗАНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГУ»)**

**ПРОРЕКТОР
ПО НАУКЕ И КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ**

Красносельская ул., д. 51, Казань, 420066
тел./факс (8-843) 519-43-01
E-mail kgeu@kgeu.ru

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по науке и

И.В.

2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на диссертационную работу Иванова Дмитрия Михайловича «Моделирование и анализ переходных процессов при ограничении тока короткого замыкания в электроэнергетической системе с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика (технические науки).

Актуальность темы диссертации

В настоящее время развитие электроэнергетики во всех странах претерпевает существенные преобразования, обусловленные новыми энергосберегающими технологиями, возобновляемыми источниками энергии и открытиями новых физических свойств материалов и явлений. При этом, рост мощностей генерации и плотности электрических нагрузок в энергосистеме приводит к систематическому повышению уровней токов короткого замыкания (КЗ). Значительная часть эксплуатируемого электрооборудования (силовые трансформаторы, выключатели, шинные конструкции и др.) имеет пределы коммутационной и динамической стойкости, не рассчитанные на современные уровни токов КЗ. Это создает предпосылки к физическому повреждению электрооборудования при аварии.

Сегодня, благодаря уникальным свойствам сверхпроводящих материалов, разрабатываются и создаются силовые высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) трансформаторы с функцией ограничения тока. Это направление исследований соответствует основным задачам повышения энергоэффективности и надежности электросетей, изложенным в «Энергетической стратегии Российской Федерации до 2050 года». Поэтому исследования переходных процессов при ограничении тока короткого замыкания в электроэнергетической системе с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором является актуальной задачей.

Принцип работы токоограничивающего ВТСП трансформатора основан на мгновенном повышении активного сопротивления обмоток трансформатора в момент КЗ. Это явление делает актуальной задачу исследования электромеханических переходных процессов в электроэнергетической системе и тепловых процессов в обмотках ВТСП трансформатора при коротком замыкании. При этом важно рассматривать эти процессы комплексно, что требует разработки математической модели режимов электроэнергетической системы, включающей в себя ВТСП трансформатор.

Таким образом, тема диссертационной работы актуальна и обладает значительной научной и практической ценностью для электроэнергетической отрасли.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам Паспорта научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика:

пункту 12 - «Разработка методов расчета, прогнозирования, оптимизации и координации уровней токов короткого замыкания на электростанциях и в электрических сетях энергосистем»;

пункту 14 – «Разработка методов расчета и моделирования установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем и сетей, включая технико-экономическое обоснование технических решений, разработка методов управления режимами их работы».

Общая характеристика работы

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка терминов, списка литературы, включающего в себя 105 библиографических ссылок, двух приложений. Общий объем работы составляет 167 страниц, включая 11 таблиц и 111 рисунков.

Во **введении** диссертационной работы представлена общая характеристика работы, показана актуальность, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы выносимые на защиту положения.

В **первой главе** представлен анализ проблемы ограничения токов короткого замыкания, которая возникает в электрических сетях классов напряжений 10 - 220 кВ. Рассмотрены особенности и последствия возникновения аварийных режимов в электрических сетях. Проведен критический обзор мировых и отечественных достижений и

разработок на основе явления сверхпроводимости в области электроэнергетики. Одно из наиболее важных направлений – сверхпроводящие трансформаторы.

Во **второй главе** представлен анализ влияния ВТСП трансформатора на электромагнитные и тепловые переходные процессы в однофазной электрической сети при возникновении КЗ на выводах вторичной обмотки ВТСП трансформатора. Проведено исследование переходных процессов, возникающих в электрической сети при включении ВТСП трансформатора на холостой ход и под нагрузкой. Разработана математическая модель, учитывающая в комплексе критические параметры сверхпроводника, материал и геометрию ВТСП обмоток, особенности криогенной охлаждающей жидкости, параметров магнитной системы трансформатора, а также параметры электрической сети, в которой функционирует трансформатор. Предложенная математическая модель верифицирована экспериментальными исследованиями на двух физических моделях однофазных силовых понижающих ВТСП трансформаторов с функцией ограничения тока КЗ.

Третья глава посвящена исследованию возможности использования ВТСП трансформаторов для ограничения ударных токов трехфазного и двухфазного КЗ. Проведена оценка возможности нормальной работы ВТСП трансформатора в цикле автоматического повторного включения (АПВ). Рассмотрен наиболее тяжелый режим отключения КЗ, при котором линия отключается только второй (резервной) ступенью максимальной токовой защиты (МТЗ) с максимальной выдержкой времени. Представленные исследования выполнялись с помощью, разработанной в ПВК Matlab/Simulink численной модели.

Выявлены основные факторы перегрева обмоток ВТСП трансформатора в режиме ограничения тока КЗ. Представлена зависимость эффективности ограничения тока КЗ от показателя нелинейности вольт-амперной характеристики (ВАХ) ВТСП ленты.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния переходных электромеханических процессов в электроэнергетической системе на тепловую устойчивость ВТСП обмоток и ВТСП трансформаторов на динамическую устойчивость режима ЭЭС с симуляцией процессов в ПВК Matlab/Simulink. Рассматривалось одно из основных расчетных возмущений – трехфазное короткое замыкание в начале одной из отходящих от шин с трансформатором линий электропередачи.

Результаты исследования показали, что динамическая устойчивость зависит от величины активного сопротивления ВТСП трансформатора, которое возникает в момент ограничения тока и компенсирует потерю мощности генератора при КЗ. При этом, на тепловую устойчивость обмоток ВТСП трансформатора существенное влияние оказывает длительность КЗ.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана математическая модель режимов электроэнергетической системы, позволяющая рассчитывать электромагнитные, электромеханические и тепловые переходные процессы, возникающие при включении ВТСП-трансформатора и при коротких замыканиях. Модель учитывает критические параметры сверхпроводника, геометрию обмоток ВТСП трансформатора, электромагнитные характеристики элементов сети и специфику криогенного охлаждения обмоток жидким азотом.

2. Доказано, что трансформаторы с ВТСП обмотками можно применять для ограничения ударных токов короткого замыкания в электроэнергетических системах. Экспериментальными исследованиями установлено снижение ударного тока КЗ в 2,95 раза.

3. Выявлено влияние показателя нелинейности ВАХ обмоток ВТСП трансформатора на эффективность токоограничивающей функции. Показано, что при $n = 15$ уровень ограничения тока снижается на 29,4% по сравнению с $n = 35$, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации ВТСП трансформаторов.

4. Установлено, что обмотки ВТСП трансформатора способны возвращать сверхпроводящее состояние после ограничения тока КЗ за время бестоковой паузы цикла АПВ.

5. Предложены критерии безопасного возврата сверхпроводящего состояния ВТСП обмоток после ограничения тока КЗ.

6. Динамическая устойчивость параллельной работы генераторов в энергосистеме зависит от величины активного сопротивления ВТСП трансформатора, которое возникает в момент ограничения тока и компенсирует потерю мощности генератора при КЗ.

Научная новизна

1. Впервые разработана математическая модель режимов электроэнергетической системы, учитывающая в комплексе основные электрические, магнитные, механические и тепловые процессы в элементах электрической сети и ВТСП обмотках трансформатора, особенности охлаждения обмоток жидким азотом, обеспечивающая проведение расчетов для исследования возможностей использования ВТСП трансформатора с целью эффективного ограничения токов КЗ и обеспечения динамической устойчивости параллельной работы генераторов в энергосистеме.

2. Показана необходимость совместного учета электромеханических и тепловых переходных процессов в электроэнергетической системе с ВТСП трансформатором при анализе динамической устойчивости параллельной работы генераторов в энергосистеме.

3. Выявлены основные факторы возникновения недопустимых перегревов ВТСП обмоток токами включения трансформатора или короткого замыкания.

4. Выявлено, что увеличение показателя нелинейности вольт-амперной характеристики обмоток ВТСП трансформатора повышает эффективность токоограничивающей функции.

5. Обоснованы условия возврата сверхпроводящего состояния ВТСП трансформатора в зависимости от кратности тока КЗ по отношению к критическому току ВТСП ленты.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

Разработанные практические рекомендации, математическая модель и созданные прототипы ВТСП-трансформаторов с функцией ограничения тока короткого замыкания служат основой для создания промышленных образцов. Их внедрение в электрические сети позволит обеспечить эффективное ограничение токов КЗ и повысить динамическую устойчивость параллельной работы генераторов в электроэнергетической системе.

Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе Новосибирского государственного технического университета и Сибирского государственного университета водного транспорта. Представлены акты внедрения результатов диссертационной работы в деятельность компаний ООО «ИНПЭС» и ТОО «Павлодарэнергоэкспертиза».

Достоверность исследований

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается корректностью примененных методик теоретического исследования, а также согласованностью данных, полученных в ходе численного моделирования и экспериментальных исследований с использованием поверенного оборудования и лицензионного программного обеспечения.

Замечания и вопросы по диссертационной работе

1. Отсутствует четкое описание границ применимости разработанной модели. Не указаны диапазоны параметров сети (мощность КЗ, индуктивность, удаленность от источника и т.д.), в которых предложенная модель сохраняет адекватность.

2. Преимущества применения ВТСП трансформатора показаны в отрыве от экономического аспекта. В выводах отсутствует сравнительный анализ капитальных и эксплуатационных затрат на предлагаемое решение в сравнении с традиционными ограничителями тока или трансформаторами.

3. В главе 4 следовало рассмотреть влияние ВТСП трансформатора на динамическую устойчивость в более сложной системе, например при наличии двух синхронных генераторов или параллельной работе ВТСП трансформаторов.

4. Некоторые графики переходных процессов представлены без необходимой разметки: отсутствуют указания моментов времени возникновения

КЗ и перехода ВТСП элемента в резистивное состояние, что затрудняет их интерпретацию.

5. Стр. 87. На рисунках 2.44 и 2.45. при сравнении результатов математического моделирования тока включения ВТСП трансформатора с экспериментальными данными наблюдаются расхождения. Чем они объясняются?

6. Адекватность представленной в диссертации математической модели подтверждена физическими экспериментами при питающем ВТСП трансформаторе напряжении не более 400 В. Справедливо ли использовать данную модель при моделировании электрических сетей более высокого класса напряжения, например, 6-10 кВ и выше?

7. В разделе 3.5.2 диссертационной работы утверждается и доказывается возможность ВТСП трансформатора работать в цикле АПВ. При этом неясно, как влияет тип релейной защиты на процесс восстановления ВТСП обмотками сверхпроводящего состояния.

8. В работе не рассмотрены вопросы влияния ВТСП трансформатора с токоограничивающей функцией на работу коммутационного оборудования.

9. В тексте встречаются опечатки и стилистические погрешности.

Приведённые замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. При этом замечания следует рассматривать как рекомендации автору для дальнейшей работы.

Общее заключение

Диссертационная работа Иванова Дмитрия Михайловича является законченной научно-квалификационной работой, в которой представлено решение актуальной задачи по исследованию влияния токоограничивающей функции ВТСП трансформаторов на переходные процессы в электроэнергетической системе и устойчивость работы синхронных генераторов, имеющей существенное значение для электроэнергетики.

Диссертационная работа представляет собой целостное самостоятельное исследование, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, заслуживающие публичной защиты.

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 14 научных работ, в их числе 2 статьи в журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК; 6 статей в международных наукометрических базах Scopus и Web of Science и 4 статьи в сборниках трудов международных и всероссийских конференций, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Диссертация Иванова Дмитрия Михайловича «Моделирование и анализ переходных процессов при ограничении тока короткого замыкания в

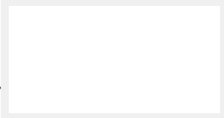
электроэнергетической системе с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, изложенным в п.п. 9 — 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 (с изменениями от 16.10.2024 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Автор диссертации, Иванов Дмитрий Михайлович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3. Электроэнергетика.

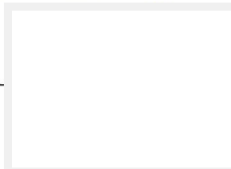
Отзыв на диссертацию Иванова Д.М., обсужден и одобрен на заседании кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ», протокол № 25 от 11.11.2025 г.

Отзыв подготовлен заведующим кафедрой электроснабжения промышленных предприятий, к.т.н, доцентом Петровым Тимуром Игоревичем.

Заведующий кафедрой Электроснабжения
промышленных предприятий КГЭУ,
к.т.н, доцент

—  — Петров Тимур Игоревич

Ученый секретарь кафедры Электроснабжения
промышленных предприятий КГЭУ
д.т.н., профессор

—  — Грачева Елена Ивановна

Сведения о ведущей организации:

Полное и сокращенное наименование
организации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический
университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

Место нахождения

420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул.
Красносельская, д. 51

Телефон

(843) 519-40-02

Адрес электронной почты

kgeu@kgeu.ru

Адрес сайта организации

www.kgeu.ru

Сведения о лице, утвердившем отзыв ведущей организации:

ФИО

Ившин Игорь Владимирович

Ученая степень, ученое звание

доктор технических наук, профессор

Должность

проректор по науке и коммерциализации ФГБОУ
ВО «КГЭУ»

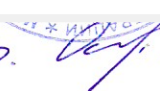
Телефон

(843) 519-43-72

Адрес электронной почты

inbin.iv@kgeu.ru

Подписи Ившина И.В., Петрова Т.
Начальник отдела кадров ФГБОУ

Отзыв рассмотрен 26.11.2025г.  /Иванов Д.М.
С отзывом ознакомлен 26.11.2025г.  /Иванов Д.М.