

ОТЗЫВ

официального оппонента – доктора технических наук, профессора
Горюнова Владимира Николаевича на диссертацию
Иванова Дмитрия Михайловича на тему «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

1 Актуальность темы диссертации обусловлена стратегическими задачами модернизации электроэнергетического комплекса Российской Федерации, определенными в Энергетической стратегии России. Ключевой проблемой современного этапа развития электроэнергетической системы является противоречие между необходимостью наращивания генерирующих мощностей для обеспечения растущего электропотребления и ограничениями по пропускной способности существующего оборудования, обусловленными ростом уровней токов короткого замыкания. Особую значимость данная проблема приобретает в контексте обеспечения устойчивости параллельной работы синхронных генераторов в энергосистеме. Превышение расчетных уровней токов короткого замыкания (КЗ) создает реальную угрозу нарушения динамической устойчивости генераторов и каскадного развития аварий, что подтверждается мировым опытом крупных системных аварий. Сложившаяся ситуация требует новых технических решений и мер по ограничению токов КЗ при одновременном сохранении и повышении устойчивости электроэнергетической системы.

Исходя из вышесказанного, одними из наиболее перспективных устройств, способных обеспечить эффективное ограничение токов короткого замыкания и повышение динамической устойчивости параллельной работы генераторов в энергосистеме, являются высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) трансформаторы. Разработка и исследование ВТСП трансформаторов вызывает большой интерес и описывается в работах ученых ведущих мировых институтов. Однако отсутствие комплексных математических моделей, адекватно описывающих взаимосвязанные тепловые процессы в ВТСП трансформаторе и электромагнитные, электромеханические переходные процессы энергосистеме при коротких замыканиях, сдерживает их практическое внедрение. В связи с этим разработка моделей и проведение анализа переходных процессов при ограничении токов КЗ с использованием ВТСП трансформаторов представляет собой актуальную научную задачу, имеющую существенное значение для повышения устойчивости, безопасности и эффективности функционирования электроэнергетических систем.

Целью диссертационной работы является исследование условий применимости ВТСП трансформаторов в электрических сетях и энергосистемах для ограничения токов КЗ и повышения динамической устойчивости

параллельной работы генераторов путем моделирования и анализа электромагнитных, электромеханических и тепловых переходных процессов.

Объект исследования – электрические сети с ВТСП трансформаторами.

Предмет исследования - электромагнитные, электромеханические и тепловые переходные процессы, возникающие в электрической сети с ВТСП трансформаторами.

2 Анализ содержания диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка терминов, списка литературы, состоящего из 105 источников, двух приложений. Общий объем работы составляет 167 страниц, включая 11 таблиц и 111 рисунков.

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи, описаны научная новизна, практическая значимость результатов внедрения и апробация полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту положения.

Первая глава посвящена анализу проблемы повышения уровней токов КЗ в электроэнергетической системе. Представлен критический обзор существующих технических решений и методов ограничения токов КЗ. Значительное внимание уделено обзору современных мировых и отечественных научно-технических достижений в области применения явления сверхпроводимости в электроэнергетике. В результате анализа установлено, что одним из наиболее перспективных направлений являются сверхпроводящие трансформаторы, обладающие потенциалом для решения задач ограничения токов короткого замыкания.

Вторая глава посвящена исследованию электромагнитных и тепловых переходных процессов при коротком замыкании в однофазной электрической сети, включающей в себя ВТСП трансформатор. Моделирование, указанных выше процессов, проводилось методами численного моделирования в ППК Matlab/Simulink с использованием, разработанной автором, математической модели. Представленная в работе модель совместно рассчитывает тепловой процесс в обмотках ВТСП трансформатора и электромагнитный переходный процесс в электрической сети, с учетом: зависимости критических параметров сверхпроводника от температуры и воздействия внешнего магнитного поля, слоистой структуры и геометрии ВТСП ленты, тепловых и электрических параметров элементов электрической сети, параметров магнитной системы трансформатора, процесса охлаждения обмоток жидким азотом.

Проведен ряд экспериментальных исследований на разработанных прототипах силовых ВТСП трансформаторов: включение ВТСП трансформатора на холостой ход, возникновение короткого замыкания на выводах вторичной обмотки. Адекватность математической модели подтверждается результатами экспериментальных исследований, с расхождением 1,99%.

Исследован процесс нагрева обмоток при коммутации ВТСП трансформатора под нагрузкой и при КЗ на вторичной обмотке.

Основное содержание **третьей главы** составляет анализ применения ВТСП трансформаторов для ограничения ударных токов трехфазного и

двухфазного КЗ в распределительной электрической сети класса напряжения 10 кВ. На основе численного моделирования в ПБК Matlab/Simulink была дана оценка применимости ВТСП трансформатора в режиме АПВ - при отключении КЗ резервной защитой с максимальной выдержкой времени. Проведено сравнение эффективности использования ВТСП трансформатора с классическим трансформатором типа ТМГ. Результаты моделирования тепловых процессов в обмотка ВТСП трансформатора при КЗ, позволили определить факторы, существенным образом влияющие на тепловую стабильность ВТСП обмоток.

Выявлено влияние показателя нелинейности ВАХ и критического тока ВТСП ленты на эффективность токоограничивающей функции ВТСП трансформатора. Предложены критерии безопасного возврата сверхпроводящего состояния обмотками ВТСП трансформатора после устранения короткого замыкания.

В четвертой главе исследуется взаимовлияние электромеханических переходных процессов в электроэнергетической системе (ЭЭС) и тепловых процессов в ВТСП трансформаторе при ограничении тока КЗ. С использованием модели в ПБК Matlab/Simulink проведен анализ двух ключевых аспектов: влияния переходных процессов на тепловую устойчивость ВТСП обмоток и обратного воздействия трансформатора на динамическую устойчивость режима ЭЭС. Моделирование выполнялось для одного из наиболее тяжелых возмущений - трехфазного короткого замыкания в начале отходящей линии в системе генератор-трансформатор-линия-шины бесконечной мощности.

Результаты показали, что повышение активного сопротивления ВТСП трансформатора в аварийном режиме компенсирует потерю мощности генератора при КЗ, тем самым положительно влияя на динамическую устойчивость системы. Однако, в экспериментах с большим значением токоограничивающего активного сопротивления было установлено ухудшение динамической устойчивости, а в некоторых случаях – выпадение генератора из синхронизма.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложениях содержатся копии свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ и актов о внедрении результатов диссертационной работы.

3 Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует следующим пунктам Паспорта научной специальности 2.4.3. Электроэнергетика:

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

Пункт 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».

4 Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Автореферат диссертации в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

5 Методы исследований. Методологическую основу диссертации составляют ключевые положения комплекса научных дисциплин, включая теоретическую электротехнику, электромагнетизм, математический анализ, термодинамику и теорию устойчивости, а также современные подходы к имитационному моделированию. Основная сложность исследования связана с комплексным характером объекта, в котором протекают сопряженные физические процессы различной природы.

6 Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в диссертационной работе, обоснованы приведенными теоретическими положениями и результатами, полученными при проведении экспериментальных расчетов переходных процессов.

Достоверность исследований подтверждается корректным использованием фундаментальных теоретических основ электротехники, а также согласованностью результатов численного и экспериментального моделирования, полученных на моделях электрических сетей с ВТСП трансформаторами. Результаты расчетов переходных процессов, выполненные методами математического и имитационного моделирования, сопоставимы с результатами, полученными в ходе натурного эксперимента. Точность натурных измерений обеспечена применением поверенного сертифицированного оборудования.

7 Новизна научных положений и выводов

Положения, выносимые на защиту, содержат новые научные результаты и свидетельствуют о личном вкладе автора диссертации в науку. Научная новизна работы заключается в следующем:

– Впервые разработана математическая модель режимов электроэнергетической системы генератор - ВТСП трансформатор – линия электропередачи – шины приемной энергосистемы, 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.

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

– Выявлено, что основными факторами возникновения недопустимых перегревов ВТСП обмоток токами включения трансформатора или короткого замыкания в сети являются толщина стабилизирующего слоя ВТСП ленты и режим кипения охлаждающей криогенной жидкости.

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

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

Научные положения подтверждаются авторскими свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ. Анализ этих положений позволяет определить уровень новизны - результаты являются новыми.

8 Практическая и теоретическая значимость

Программные продукты и экспериментальные образцы, разработанные автором, могут быть использованы для проведения научно-исследовательских и опытно конструкторских работ с целью изучения характера переходных процессов в сетях с ВТСП трансформаторами, исследования режимов электрических сетей, разработки новых устройств релейной защиты и автоматики, поиска оптимальной конструкции ВТСП трансформаторов, повышения надежности функционирования электроэнергетических систем.

Физические модели ВТСП трансформаторов, обеспечивающие ограничение ударных токов короткого замыкания и повышение динамической устойчивости синхронных генераторов в энергосистеме, представляют собой основу для выполнения опытно-конструкторских работ по созданию опытных и промышленных образцов. Для их успешной реализации предложен комплекс практических рекомендаций и моделей, устанавливающий обоснованные требования к ключевым параметрам ВТСП трансформаторов, таким как плотность тока, напряжение короткого замыкания, магнитная индукция в магнитопроводе, природа потерь в обмотках и критические характеристики сверхпроводящего материала.

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».

Разработанные математические модели имеют «потенциал» дальнейшего развития для учета структурных особенностей электрических сетей, в которых будут применяться ВТСП трансформаторы.

9 Публикация основных результатов диссертационной работы

Результаты исследований апробированы участием автора в шести международных и всероссийских научно-технических конференциях, в отраслевых научно-технических совещаниях, на научных семинарах профильных кафедр ведущих российских университетов.

Основные положения диссертации опубликованы в 14 научных работах: в 2 научных статьях в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в 6 публикациях индексируемых в международных наукометрических базах Scopus и Web of Science, в 4 статьях сборников трудов международных и всероссийских конференций. Автором получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

10 Замечания по диссертационной работе

1. Утверждения о возможности применения ВТСП трансформаторов в сетях 6–10 кВ или даже 35/10 кВ основываются на экстраполяции данных с физических моделей, что может быть некорректным. Не показано, как учтены такие факторы, как: увеличение тепловой инерции обмоток; неравномерность распределения тока и магнитного поля в крупногабаритных обмотках; реальные условия охлаждения в промышленном исполнении (например, циркуляция жидкого азота).

2. Автор демонстрирует снижение ударного тока КЗ в 2,95 раза, что представляется впечатляющим. Однако в работе не приведено сравнение с другими методами ограничения токов КЗ, такими как: токоограничивающие реакторы; разделение секций шин; применение твердотельных токоограничителей. Без такого сравнения затруднительно судить о реальной конкурентоспособности ВТСП трансформаторов.

3. Автор делает акцент на «безопасном возврате в сверхпроводящее состояние», но не рассмотрены сценарии отказов, которые могут возникнуть в реальных условиях:

- Что произойдет при многократных КЗ за короткий промежуток времени?
- Какова вероятность «теплого срыва» при неблагоприятных условиях охлаждения (например, при снижении уровня жидкого азота)?
- Как система поведёт себя при частичной деградации сверхпроводника?

4. Выявлено, что эффективность токоограничения сильно зависит от показателя нелинейности $BAH(n)$ и критического тока (I_k). При этом, характеристики ВТСП лент (особенно n) могут значительно варьироваться в зависимости от производителя, технологии изготовления и условий эксплуатации. Автор ссылается на продукцию компании «СуперОкс», но не показано, насколько универсальны выводы для других типов лент (REBCO, Bi-2223 и др.).

5. В главе 4 показано, что увеличение активного сопротивления ВТСП трансформатора при КЗ может как улучшать, так и ухудшать динамическую устойчивость. При $R = 100$ Ом происходит выпадение из синхронизма. Однако не указано, какое значение сопротивления является типичным для реальных ВТСП трансформаторов. Если для эффективного ограничения тока требуется $R > 50$ Ом, а это уже опасно для устойчивости, то возникает принципиальный компромисс между функциями токоограничения и устойчивости. Необходимо

определить «зоны допустимых значений» активного сопротивления, при которых достигается баланс между токоограничением и устойчивостью системы.

6. Переходные процессы в сетях с ВТСП устройствами имеют уникальные особенности (резкое изменение сопротивления, нелинейность). Однако в работе не рассмотрено, как эти особенности повлияют на работу существующих систем релейной защиты.

7. Из текста диссертации не ясно, какие были приняты допущения при моделировании переходных процессов в энергосистеме с ВТСП трансформатором.

8. Текст диссертации содержит опечатки и некоторые неточности.

Представленные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

11 Личный вклад автора

Анализ представленной диссертации и опубликованных работ показал, что все научные положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации принадлежат соискателю.

12 Соответствие диссертации критериям «Положения о присуждении ученых степеней»

Диссертационная работа отвечает требованиям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (в актуальной редакции).

п.9. Диссертационная работа Иванова Дмитрия Михайловича является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований предложены новые научно-обоснованные технические решения, направленные на снижение уровней токов короткого замыкания в электроэнергетических системах путём разработки и использования высокотемпературных сверхпроводящих трансформаторов, как устройств, одновременно выполняющих функции трансформации напряжения и токоограничения, имеющие существенное значение для развития электроэнергетики.

п.10. Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, свидетельствующие о личном вкладе автора диссертации в науку. В диссертации представлены сведения о практической полезности результатов и рекомендации по использованию научных выводов.

п.11-13. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях: 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 6 статей в международных наукометрических базах Scopus и Web of Science и 4 статьи в прочих изданиях.

п.14. Диссертация соответствует требованию указания ссылок на заимствованные материалы или отдельные результаты. Заимствованного материала без ссылки на первоисточник не обнаружено.

Общее заключение

Диссертационная работа Иванова Дмитрия Михайловича на тему «Моделирование и анализ переходных процессов при ограничении тока короткого замыкания в электроэнергетической системе с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором» является законченной, самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой на актуальную тему, в которой изложены новые научно-обоснованные решения актуальной задачи эффективного ограничения ударных токов короткого замыкания, направленные на разработку комплексной математической модели и физических прототипов ВТСП трансформаторов, обеспечивающих повышение динамической устойчивости параллельной работы синхронных генераторов в электроэнергетических системах, с учётом взаимосвязанных электромагнитных, электромеханических и тепловых переходных процессов, имеющие существенное значение для развития страны.

Диссертационная работа Иванова Дмитрия Михайловича соответствует требованиям 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (с изменениями),

На основании вышеизложенного считаю, что Иванов Дмитрий Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3. Электроэнергетика.

Официальный оппонент,
Профессор кафедры «Электроснабжение
промышленных предприятий», доктор
технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Омский государственный
технический университет»

Горюнов Владимир Николаевич

«25» ноября 2025 г.

Полное наименование организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Омский государственный технический университет»

Юридический адрес: 644050, Сибирский федеральный округ, Омская область, г. Омск, Пр.
Мира, д. 11

Телефон: (3812) 65-34-07

Эл. адрес: vladimirgoryunov2016@yandex.ru

Сведения (подпись) Горюнова В.Н.
Ученый секретарь ОмГТУ

А. Ф. Немцова
ноября 2025 г.

*Озв. получен 01.12.2025г.
Взв. /Иванов Д.М./*

С отзывом ознакомлен 01.12.2025г. /Иванов Д.М./