

На правах рукописи



Иванов Дмитрий Михайлович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ
ОГРАНИЧЕНИИ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ СВЕРХПРОВОДЯЩИМ
ТРАНСФОРМАТОРОМ**

Специальность 2.4.3. Электроэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Новосибирск - 2025

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

Научный руководитель: **Манусов Вадим Зиновьевич,**
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Горюнов Владимир Николаевич**
Доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Омский государственный
технический университет», кафедра
«Электроснабжение промышленных
предприятий», профессор;
Булатов Юрий Николаевич
Кандидат технических наук, доцент, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Братский
государственный университет», кафедра
«Энергетика», доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «**Казанский государственный
энергетический университет**», г. Казань.

Защита состоится «25» декабря 2025 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации www.nstu.ru.

Автореферат разослан «__» октября 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент

Анатолий Анатольевич Осинцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В электроэнергетических системах все более остро стоит вопрос координации и ограничения уровней токов короткого замыкания (КЗ), которые оказывают существенное влияние на выбор защитно-коммутационной аппаратуры, безопасность и устойчивость функционирования электросетевого, подстанционного и станционного высоковольтного электрооборудования.

Токи короткого замыкания вызывают повышенный нагрев проводников и контактов, способный ускорить старение и разрушение изоляции. При этом, наибольшее электродинамическое воздействие на витки обмоток трансформаторов и электрических машин, электрические шины распределительных устройств оказывает ударный ток КЗ. В связи с этим приходится завышать характеристики защитно-коммутационного оборудования и других элементов электросетевого комплекса для соответствия токам КЗ. Вышеуказанная проблема некоторым образом решается с помощью ограничителей токов КЗ, в качестве которых обычно используются токоограничивающие реакторы. К недостаткам существующих видов реакторов относятся их высокая удельная стоимость и увеличение потерь энергии в сети в нормальных режимах.

Согласно «Энергетической стратегии Российской Федерации до 2035 года» (Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 г. № 1523-р), применение новых технологий и устройств на основе высокотемпературной сверхпроводимости, с целью повышения энергоэффективности и устойчивости электроэнергетической системы, является актуальной задачей. В этой связи, для решения сопутствующих проблем, актуально использование высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) трансформаторов. Эти электрические машины способны обеспечить ограничение токов КЗ, в частности ударный ток, не оказывая негативного влияния на нормальный режим электрической сети. Однако, возникновение существенного активного сопротивления в момент ограничения тока, делает актуальной задачу исследования электромагнитных, электромеханических и тепловых процессов, возникающих в сети при аварии или коммутации. На сегодняшний день научным сообществом еще не выработаны устоявшиеся методы и модели анализа режимов электрических сетей с ВТСП трансформаторами с функцией ограничения тока. Кроме того, существующие имитационные модели сосредоточены на представлении одного типа переходного процесса и не позволяют рассмотреть задачу комплексно.

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в разработку и исследование влияния высокотемпературных сверхпроводящих токоограничивающих устройств и трансформаторов на режимы электроэнергетической системы внесли: Волков Э.П., Высоцкий В.С., Манусов В.З., Сотников Д.В., Самойленков С.В., Александров Н.В., Флейшман Л.С. и др. Исследования по поиску новых решений и методов с целью ограничения токов КЗ представлены в диссертационных работах Игнатова В.В., Юренкова Ю.П., Ищенко А.А., Брилинского А.С.

Высокую степень актуальности и важности темы диссертационного исследования подтверждают научные публикации зарубежных авторов: Komarzyniec G., Hellmann S., Mohammad Yazdani-Asrami, Berger A., Dai S., Hekmati

A., M. Iwakuma, Noe M., Wojtasiewicz G., Chen X., Shen B., Zhang M., Mohammad Yazdani-Asrami и др.

Объект исследования – электрические сети с ВТСП трансформаторами.

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

Целью 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.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка математической и имитационной моделей однофазных и трехфазных электрических сетей, включающих в себя ВТСП трансформатор, для совместного анализа электромагнитных, электромеханических и тепловых переходных процессов.

2. Создание физической модели ВТСП трансформатора для проведения экспериментальных исследований и верификации математической модели.

3. Анализ влияния геометрических, электрических и тепловых характеристик обмоток ВТСП трансформатора на возможности эффективного ограничения токов короткого замыкания и повышения динамической устойчивости параллельной работы генераторов в электроэнергетической системе.

4. Исследование явлений потери ВТСП обмотками сверхпроводящего состояния и его последующего возврата, их тепловой устойчивости.

Методология и методы исследования. Полученные в диссертации результаты базируются на основных положениях фундаментальных и прикладных наук, таких как теоретические основы электротехники, электромагнетизм, математический анализ, термодинамика, теория устойчивости, теория имитационного моделирования, теория эксперимента. Объект исследования характеризуется сложностью взаимодействия большого числа физических процессов различной природы.

Научная новизна:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

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:

1. Созданные две физические модели ВТСП трансформаторов с функциями ограничения ударного тока КЗ и повышения динамической устойчивости параллельной работы генераторов могут быть использованы для выполнения НИиОКР по созданию опытных и промышленных образцов ВТСП трансформаторов.

2. Разработаны практические рекомендации для определения основных параметров ВТСП трансформатора на основе обоснованных требований к величине плотности тока ($200-400 \text{ А/мм}^2$), напряжению короткого замыкания, магнитной индукции стержня, природе потерь в сверхпроводящих обмотках, а также критических параметров сверхпроводника при проектировании ВТСП трансформаторов с функцией ограничения токов КЗ.

3. Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе при изложении курсов «Энергосбережение и энергоэффективность в электроэнергетике», «Системы электроснабжения», «Переходные процессы в электроэнергетических системах», «Электроэнергетические системы и сети», «Теория и практика инженерного исследования» Новосибирского государственного технического университета и Сибирского государственного университета водного транспорта. Представлены акты внедрения результатов диссертационной работы в деятельность компаний ООО «ИНПЭС» и ТОО «Павлодарэнергоэкспертиза».

Теоретическая значимость:

1. Разработанная математическая модель комплексного моделирования электромагнитных, электромеханических процессов в ЭЭС и тепловых процессов в ВТСП трансформаторах позволяет корректно рассчитывать характеристики переходных процессов, возникающих в электроэнергетической системе при включении ВТСП трансформатора и при КЗ.

2. Разработанные математическая модель и экспериментальные образцы 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.

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

Положения, выносимые на защиту:

1. Проектирование и применение ВТСП трансформаторов с функциями ограничения токов КЗ и обеспечения динамической устойчивости параллельной работы генераторов в электрических сетях и энергосистемах должно базироваться на расчетах режимов с учетом электромагнитных, электромеханических и тепловых переходных процессов, возникающих в электроэнергетической системе и обмотках ВТСП трансформаторов.

2. Доказана возможность и эффективность применения ВТСП трансформаторов с токоограничивающей функцией в распределительных электрических сетях классов напряжения 6-10 кВ для снижения ударного тока КЗ с возвратом ими сверхпроводящего состояния за время бестоковой паузы цикла автоматического повторного включения (АПВ).

3. Комплексное моделирование электромагнитных, электромеханических процессов в сетях и тепловых процессов в ВТСП трансформаторах позволяет достоверно рассчитывать переходные процессы при включении ВТСП трансформатора или при КЗ, что подтверждено физическими экспериментами.

4. Тепловая устойчивость ВТСП обмоток при включении ВТСП трансформатора или коротком замыкании в электрической сети в основном определяется толщиной стабилизирующего слоя ВТСП ленты и режимом кипения охлаждающей криогенной жидкости.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует следующим направлениям исследований Паспорта специальности 2.4.3. Электроэнергетика:

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

П.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».

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность подтверждается выполнением численных и натурных экспериментов, реализованных на моделях электрических сетей, включающих в себя ВТСП трансформаторы. Результаты расчетов переходных процессов, выполненных методами математического и имитационного моделирования, сопоставимы с результатами, полученными в ходе натурального моделирования. Точность измерения характеристик переходных процессов, полученных в ходе натурных экспериментов, подтверждается использованием поверенного сертифицированного оборудования.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Систем электроснабжения предприятий», на Днях науки в ФГБОУ ВО «Новосибирском государственном техническом университете» (НГТУ) в 2020 - 2024 годах, на всероссийских и международных научных конференциях: «20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices» (Республика Алтай, Эрлагол, 29 июня – 3 июля 2019 г.), «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 02-06 декабря, 2019 г.), «2020 International Youth Conference on Radio

Electronics, Electrical and Power Engineering» (г. Москва, 12-14 марта 2020 г.), «XI Международная научно-техническая конференция: Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Ставрополь, 15-17 сентября 2020 г.), «2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC)» (г. Новосибирск, 13-15 ноября, 2021 г.), «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 02-06 декабря, 2023 г.). Работа отмечена грантом НГТУ «Мой первый научный проект» в 2021 году.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 14 научных работ, из них 2 статьи в журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК; 6 статей в международных наукометрических базах Scopus и Web of Science и 4 статьи в прочих изданиях. Получено два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. В работах, опубликованных в соавторстве личный вклад автора не менее 65 %.

Личный вклад соискателя.

Автору принадлежит разработка математических моделей, реализация алгоритмов в программно-вычислительных комплексах, проведение натурных экспериментов, анализ результатов, проверка достоверности исследований, подготовка публикаций и докладов по результатам исследования. Научные и практические результаты, выносимые на защиту, разработаны и получены соискателем.

Структура и объем работы. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 в связи с увеличением нагрузок потребителей и мощности генерирующих объектов, обусловленных развитием электросетевого комплекса. Рассмотрены особенности и последствия возникновения аварийных режимов в электрических сетях, влияние токов КЗ на сеть, а также характеристика существующих способов ограничения токов КЗ.

Проведен анализ мировых и отечественных достижений и разработок на основе явления сверхпроводимости в области электроэнергетики. Проведенный критический обзор существующих образцов ВТСП лент показал, что наиболее перспективным вариантом использования в качестве материалов ВТСП обмоток трансформатора являются отечественные сверхпроводящие ленты производства компании «СуперОкс».

Исследования разных авторов по применению сверхпроводящих технологий в электротехнической промышленности указывают на одно из наиболее важных направлений – сверхпроводящие трансформаторы. Обзор проведенных мировых и

отечественных исследований показал, что наиболее важными задачами на сегодняшний день являются:

- разработка методов определения оптимальных параметров и конструкции ВТСП трансформатора с учетом особенностей природы сверхпроводника для достижения наилучших технических характеристик данного устройства и повышения эффективности токоограничивающей функции;

- разработка математической и физической моделей ВТСП трансформаторов с целью проведения достоверного анализа электромагнитных, электромеханических и тепловых процессов в электрической сети, сопряженной с ВТСП трансформатором.

Во **второй главе** представлен анализ влияния ВТСП трансформатора на электромагнитные и тепловые переходные процессы в однофазной электрической сети при возникновении КЗ за трансформатором (рис. 1б), выполненный на основе результатов математического и экспериментального моделирования. Проведено исследование переходных процессов, возникающих в электрической сети при включении ВТСП трансформатора на холостой ход (рис. 1а) и под нагрузкой.

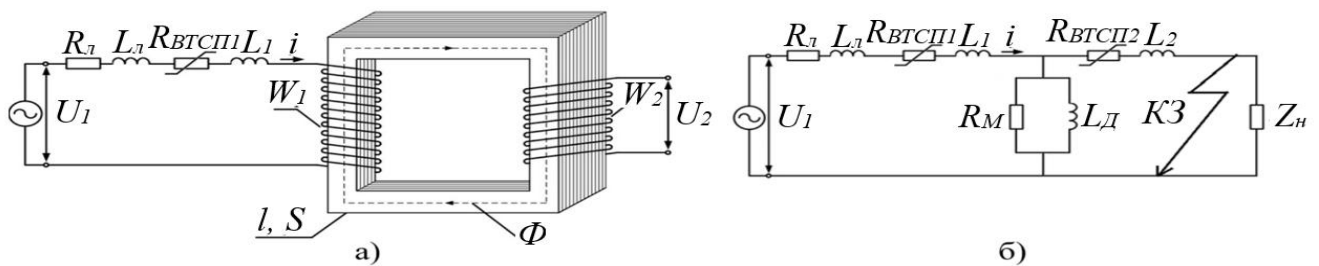


Рисунок 1 – Схемы: а) принципиальная схема в режиме холостого хода; б) схема замещения при КЗ за трансформатором

Математическая модель расчета электромагнитных и тепловых переходных процессов учитывает критические параметры сверхпроводника (критический ток, температуру, магнитное поле), материал и геометрию ВТСП ленты, особенности криогенной охлаждающей жидкости, зависимости удельных сопротивлений и теплоемкостей слоев ВТСП ленты от температуры, параметров магнитной системы трансформатора, а также параметры сети, к которой подключен трансформатор.

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{U_1 - i(R_L + R_{VTСП}(i, T))}{L_L + L_1 + L_D} \\ Q(I, T) = \int_0^t I^2 R_{VTСП}(I, T) dt \\ \frac{dT}{dt} = \frac{Q(I, T) - Aq(\Delta T)}{C_\Sigma(T)} \end{cases}, \quad (1)$$

где U_1 – питающее сеть переменное напряжение, В; i – переменный ток, А; L_D – дифференциальная индуктивность, Гн; R_L – активное сопротивление отходящей от ВТСП трансформатора линии, Ом; L_L – индуктивность отходящей линии, Гн; $R_{VTСП}(i, T)$ – активное нелинейное сопротивление первичной обмотки ВТСП трансформатора, Ом; L_1 – индуктивность рассеяния первичной обмотки, Гн; $Q(I, T)$ – количество теплоты, выделяющееся на обмотке, Дж; A – площадь

поверхности ВТСП обмотки, см^2 ; $C_{\Sigma}(T)$ – общая теплоемкость ВТСП обмотки, Дж/К; $q(\Delta T)$ – плотность теплового потока в зависимости от разности температур, Вт/см 2 .

Модель нелинейного активного сопротивления ВТСП трансформатора получена аппроксимацией вольт-амперной характеристики (ВАХ), используемой в работе ВТСП ленты второго поколения, на основе иттриевой керамики YBCO, производства отечественной компании «СуперОкс»:

$$R_{YBCO}(I, T) = \frac{E_0}{I} \left(\frac{I}{I_K(T)} \right)^n \cdot l, \quad (2)$$

где I – ток в сети, А; $I_K(T)$ – критический ток ВТСП ленты, А; E_0 – напряженность электрического поля, мкВ/см; n – показатель крутизны ВАХ, зависит от типа и параметров материала ВТСП ленты; l – длина сверхпроводящей ленты, используемой в обмотке трансформатора, м; T – температура ленты, К.

Сопротивление несверхпроводящих слоев ВТСП ленты выражены в зависимости от температуры:

$$R_{HC}(T) = \frac{1}{\frac{1}{R_{CU}(T)} + \frac{1}{R_{AG}(T)} + \frac{1}{R_{Буф}(T)} + \frac{1}{R_{Хаст}(T)}}, \quad (3)$$

где $R_{CU}(T)$ – сопротивление слоя меди в зависимости от температуры, Ом; $R_{AG}(T)$ – сопротивление слоя серебра в зависимости от температуры, Ом; $R_{Буф}(T)$ – сопротивление буферного слоя в зависимости от температуры, Ом; $R_{Хаст}(T)$ – сопротивление хастеллоя в зависимости от температуры, Ом.

По схеме, представленной на рисунке 1а) найдем эквивалентное сопротивление, позволяющее представить ВТСП обмотку в двух режимах: нормальном сверхпроводящем и режиме ограничения тока:

$$R_{ВТСП}(I, T) = \frac{R_{HC}(T) \cdot R_{YBCO}(I, T)}{R_{HC}(T) + R_{YBCO}(I, T)}. \quad (4)$$

Решение разработанной математической модели реализовано методами численного интегрирования в программно-вычислительном комплексе MATLAB/Simulink (рис. 2) с использованием элементов пакета SimPowerSystems. Использовались методы трапеций и вращающихся координат (метод Розенброка).

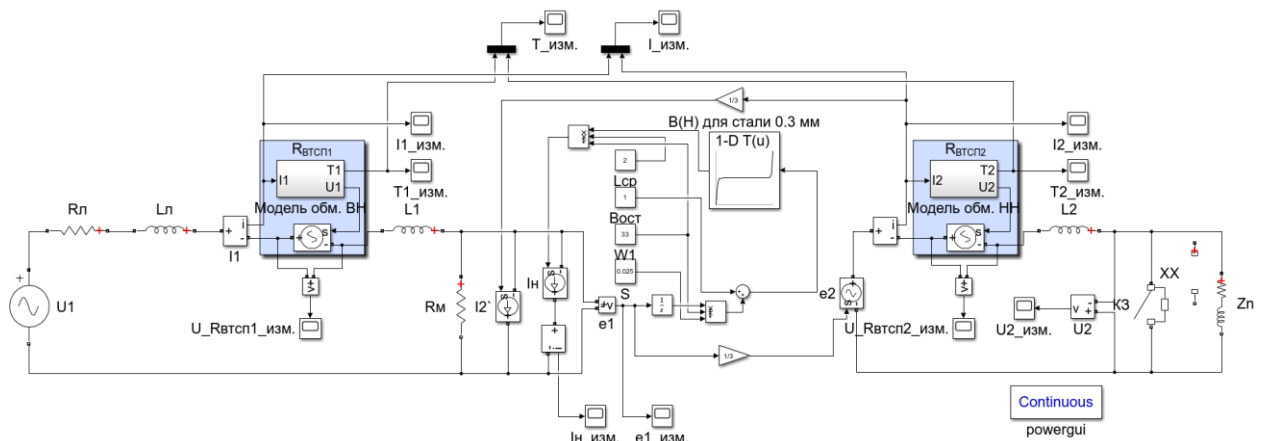


Рисунок 2 - MATLAB/Simulink модель исследуемой сети с ВТСП трансформатором

Для оценки адекватности математической и имитационной моделей проведен ряд экспериментальных исследований с помощью разработанных физических прототипов силовых понижающих ВТСП трансформаторов мощностью 9 кВА (рис. 3а) и 3 кВА (рис. 3б) с соотношением напряжений 220/73 В и 100/50 В соответственно.

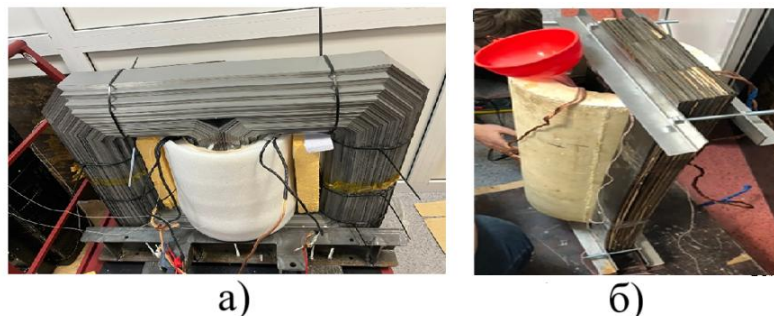


Рисунок 3 – Разработанный прототип силового понижающего ВТСП трансформатора с функцией ограничения тока КЗ: а) 220/73 В (мощность - 9 кВА); б) 100/50 В (мощность – 3 кВА)

Экспериментальные исследования включали снятие осциллограмм токов и напряжений на обмотках ВТСП трансформатора при включении на холостой ход и при коротком замыкании за трансформатором. Электрическая схема с измерительными приборами представлена на рисунке 4. Осциллограммы изменения тока и напряжения в первичной цепи регистрировались с помощью высокоточного анализатора качества электроэнергии Fluke 435-II, способного регистрировать переходный процесс в исследуемой цепи. Полученные регистратором данные анализировались с помощью программы PowerLog. Источником питания служил лабораторный автотрансформатор с возможностью регулировки напряжения $0 \div 600$ В.

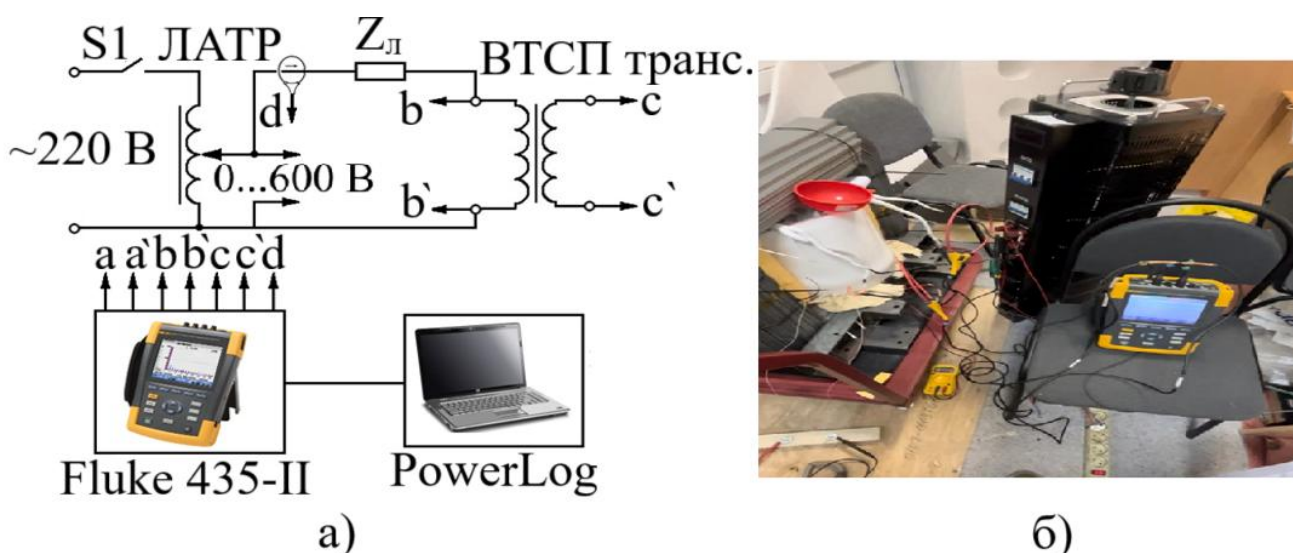


Рисунок 4 – Экспериментальные исследования: а) схема экспериментальной сети; б) фотография экспериментальной сети с измерительными приборами

В результате сравнения осциллограмм первого (рис. 5а) и первых пяти периодов (рис. 5б) пускового тока ВТСП трансформатора найденных экспериментально и рассчитанных в Matlab/Simulink, отклонение между

найденными максимумами первого пика тока составило 0,72 %, а среднее отклонение за первые 5 периодов – 1,99 %.

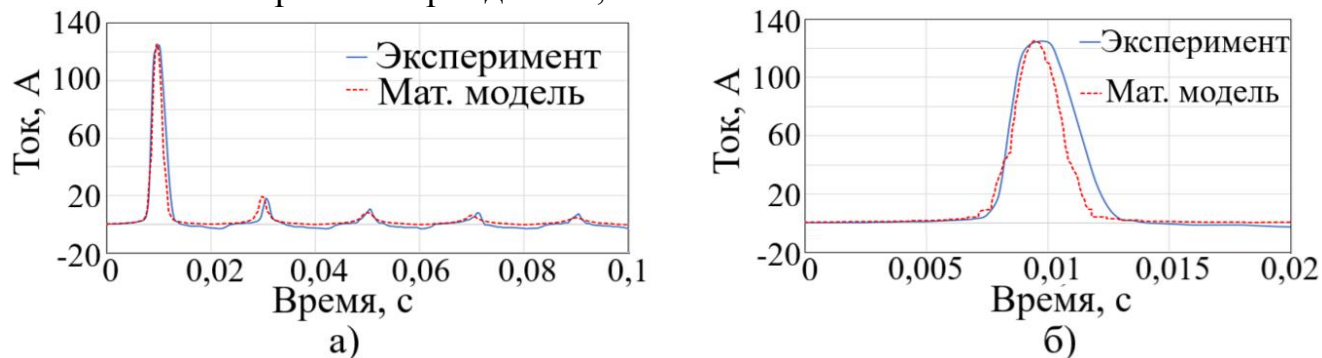


Рисунок 5 – Сравнение экспериментальных данных и численного моделирования броска тока намагничивания : а) первых пяти периодов; б) первого пика

В результате экспериментов и численного моделирования получены осциллограммы напряжения (рис. 6а) и тока (рис. 6б) при коротком замыкании на обмотке низкого напряжения ВТСП трансформатора.

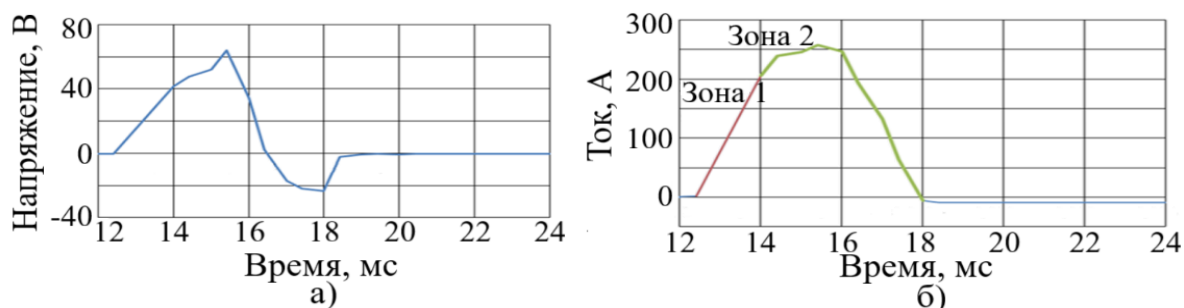


Рисунок 6 – а) Падение напряжения на обмотке НН; б) Ток в обмотке НН

Появление падения напряжения на обмотке НН (рис. 6а) свидетельствует о переходе сверхпроводника в резистивное состояние и резком повышении его активного сопротивления. По осциллограмме тока в обмотке можно видеть, что в момент времени сразу после возникновения короткого замыкания («Зона 1» на рисунке 6б) ток растёт очень быстро, так как активное сопротивление обмотки равно нулю. При превышении током критического значения проводник из состояния сверхпроводимости переходит в резистивное состояние, появляется активное сопротивление, и величина тока КЗ снижается («Зона 2» на рисунке 6б).

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод об ограничении максимального тока в 2,95 раза. Методами численного моделирования и экспериментальных исследований получен критерий возврата сверхпроводящего состояния ВТСП трансформатора по величине кратности тока КЗ к ограниченному току (рис. 7).

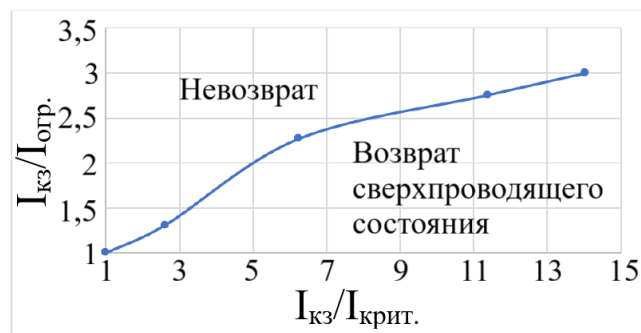


Рисунок 7 - Зависимость показателя токоограничения от отношения тока КЗ к критическому току ВТСП

Исследован процесс нагрева обмоток при коммутации ВТСП трансформатора под нагрузкой (рис. 8 и 9). Из рисунка 8 видно, что в обмотке НН

происходит резкое повышение температуры, вызванное режимом КЗ, и дальнейшая тепловая стабилизация. Рассмотренный режим безопасен для сверхпроводящих обмоток, поскольку разница температур между лентой и криогенной жидкостью не превышает 30 К, то есть жидкий азот находится в стадии пузырькового кипения и охлаждение происходит максимально эффективно. Однако, в случае второго эксперимента (рис. 9) происходит неконтролируемое повышение температуры обмотки – тепловой срыв. Этот процесс способен привести к необратимому перегреву ВТСП ленты и спровоцировать ее термическое и механическое повреждения.

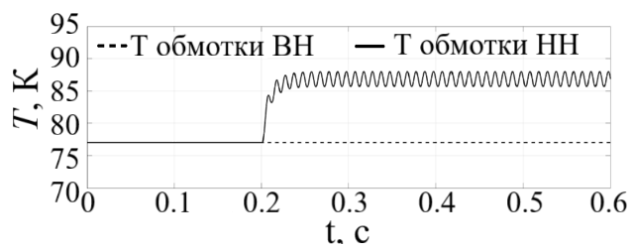


Рисунок 8 - Температура ВТСП обмоток при тепловой стабилизации

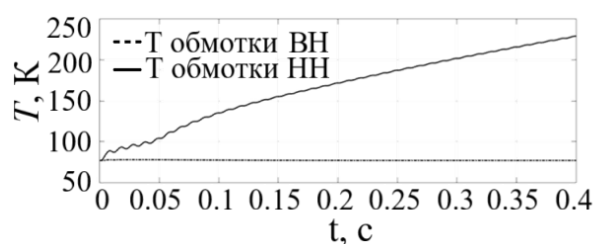


Рисунок 9 - Температура ВТСП обмоток при тепловом срыве

В третьей главе обосновывается возможность использования ВТСП трансформаторов для ограничения ударных токов трехфазного и двухфазного КЗ.

Разработанная математическая модель однофазного ВТСП трансформатора, адаптирована для использования в трехфазной электрической сети. Разработана имитационная модель в среде Matlab/Simulink (рис. 10), позволяющая оценить уровень ударного тока КЗ, процесс нагрева и охлаждения обмоток для различных видов короткого замыкания в электрической сети 10/0,4 кВ с ВТСП трансформатором и с трансформатором традиционного исполнения марки ТМГ21-1000/10/0,4.

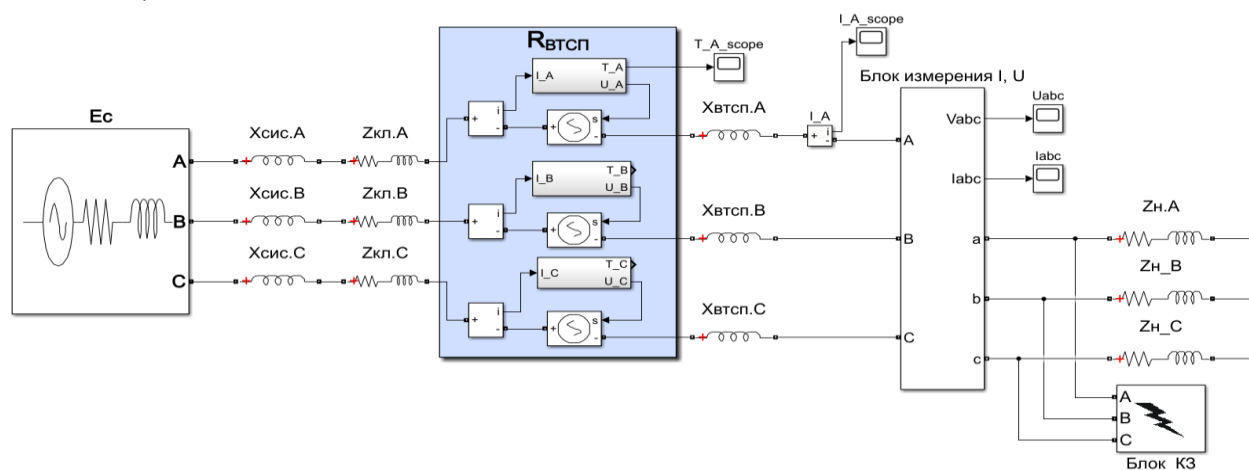


Рисунок 10 – MATLAB/Simulink модель исследуемой сети с КЗ за ВТСП трансформатором

В ПВК MATLAB/Simulink смоделирован эксперимент, при котором в начальный момент времени электрическая сеть работала в режиме холостого хода. В момент времени 0,2 с происходит трехфазное короткое замыкание ($K^{(3)}$), которое устраняется через 0,2 с. На рисунке 11 представлен график переходного процесса при возникновении трёхфазного короткого замыкания в сети, показывающий способность ВТСП трансформатора ограничивать ток короткого замыкания в

сравнении с традиционным трансформатором. На рисунке 12 приведен процесс нагрева и охлаждения обмоток фазы А ВТСП трансформатора при ограничении тока трехфазного КЗ.

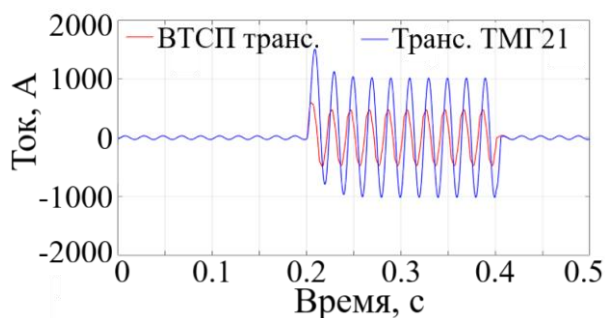


Рисунок 11 - Графики токов в фазе А при К⁽³⁾

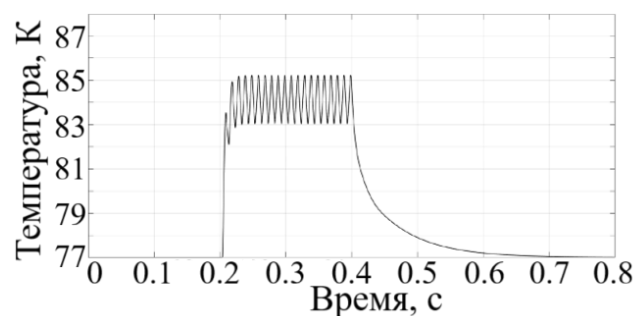


Рисунок 12 - Изменение температуры ВТСП обмоток фазы А при К⁽³⁾

Анализ графиков показал, что ВТСП трансформатор способен с высокой эффективностью ограничивать ток трехфазного и двухфазного КЗ. При этом нагрев обмоток не превышает температуру кризиса кипения жидкого азота, что говорит об эффективном охлаждении обмоток и безопасном возврате ВТСП ленты в сверхпроводящее состояние после устранения КЗ. Возврат сверхпроводящего состояния обмоток за 0,2 с после устранения КЗ, делает возможным использования ВТСП трансформаторов в режиме АПВ.

Для оценки возможности нормальной работы ВТСП трансформатора при АПВ отходящей линии, в электрической сети (рис. 13) моделируется трехфазное короткое замыкание в начале отходящей воздушной линии. КЗ отключается вакуумным выключателем после действия релейной защиты. Принимается, что на линии установлены: токовая отсечка (ТО) и две ступени максимальной токовой защиты (МТЗ).

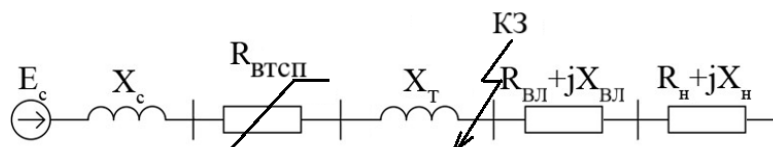


Рисунок 13 – Схема замещения моделируемой сети 35/10 кВ

Рассмотрен наиболее тяжелый режим отключения КЗ, при котором линия отключается только второй (резервной) ступенью МТЗ с максимальной выдержкой времени.

Рассматриваемые режимы линии во временных промежутках:

- 0 – 0,2 с – нормальный режим;
- 0,2 – 2,55 с – режим трехфазного КЗ и его отключение вакуумным выключателем после срабатывания второй ступени МТЗ;
- 2,55 – 3 с – бестоковая пауза;
- 3 – 4 с – успешное АПВ.

В результате моделирования получены графики тока в электрической сети с ВТСП трансформатором (рис. 14а)) и температуры (рис. 14б)) в обмотках ВТСП трансформатора. В обмотке ВТСП трансформатора происходит резкое повышение температуры (рис. 14б), вызванное режимом трехфазного КЗ. Однако, в дальнейшем (с момента времени 0,3 с до отключения линии вакуумным выключателем) наблюдается тепловая стабилизация с температурой равной 90 К. В

таком режиме ВТСП трансформатор может длительно находиться без термического повреждения его обмоток. В момент отключения линии (2,55 с) температура обмоток благодаря эффективному охлаждению начинает резко снижаться и трансформатор успевает перейти в сверхпроводящее состояние за время 0,4 с, что меньше величины минимальной бестоковой паузы цикла АПВ для электрических сетей 6-10 кВ.

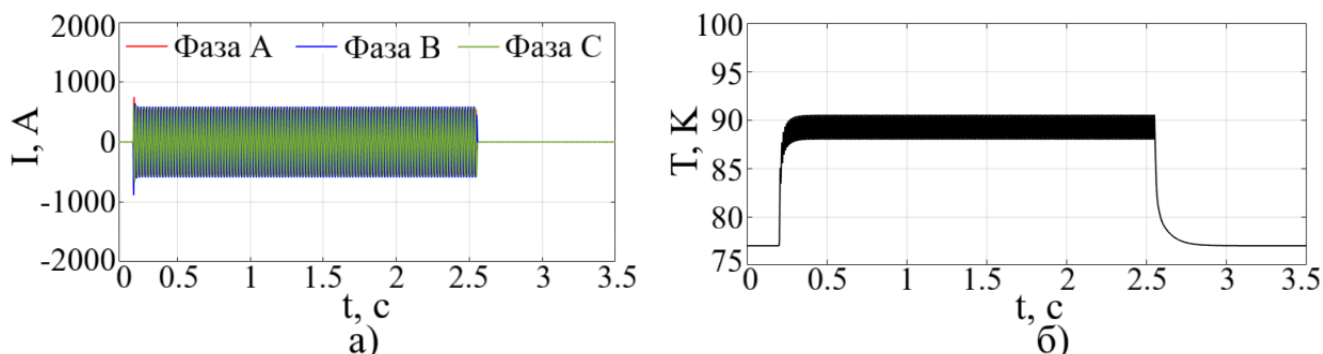


Рисунок 14 – Графики: а) тока при $K^{(3)}$, б) температуры в обмотке ВТСП трансформатора при $K^{(3)}$

На эффективность и уровень ограничения максимального тока основное влияние оказывают показатель критического тока $I_K(B, \theta)$ и показатель степени нелинейности вольт-амперной характеристики $n(B, \theta)$ ВТСП ленты.

На рисунке 15 показаны графики тока в фазе А при КЗ за ВТСП трансформатором с диапазоном n равным $15 \div 35$, с шагом 5. Данный диапазон выбран на основе реальных экспериментов, проведенных для ВТСП лент производства «СуперОкс».

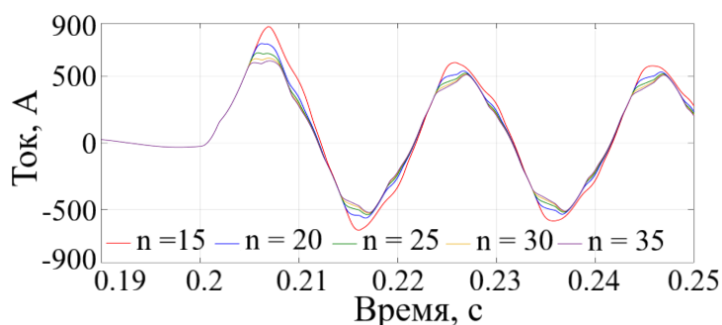


Рисунок 15 – График ограниченного тока при $K^{(3)}$ в зависимости от показателя степени ВАХ

На рисунке 16 представлены полученные в ходе моделирования зависимости: температуры обмоток фазы А от показателя степени ВАХ (рис. 16а)) и уровня токоограничения от показателя степени ВАХ (рис. 16б)).

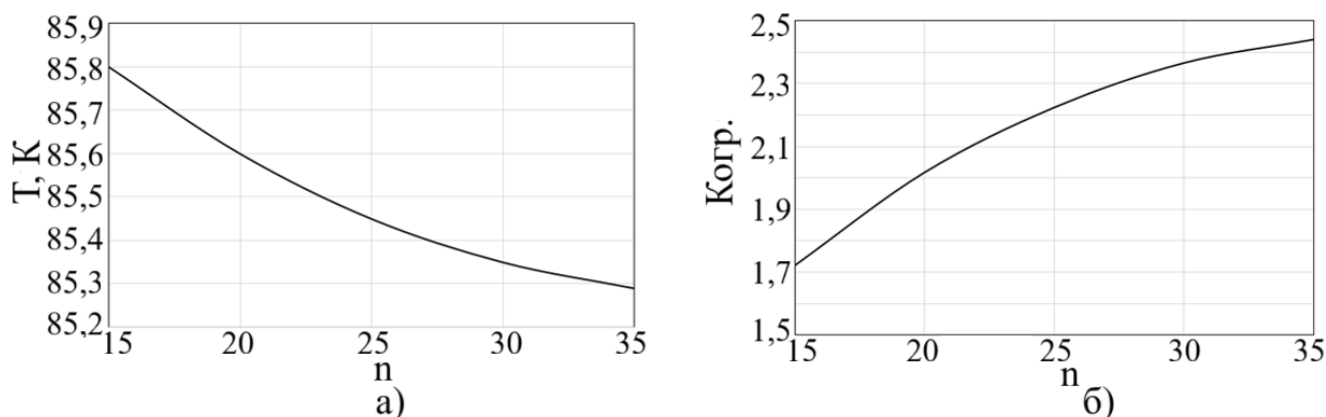


Рисунок 16 – Зависимость: а) максимальной температуры нагрева от показателя степени ВАХ; б) уровня ограничения тока от показателя степени ВАХ

Эффективность токоограничивающей функции существенно зависит от показателя степени ВАХ сверхпроводящей ленты. Влияние на нагрев ВСП провода оказалось несущественное, что позволит эффективно охлаждать устройство при снижении n . Для проведенного эксперимента уровень ограничения тока при $n = 15$ снижается на 29,4% по сравнению с $n = 35$. Установлено, что выбор проводника с малым значением n способен значительно уменьшить эффективность токоограничивающей функции.

Исследования показали, что при снижении критического тока ВСП ленты эффективность ограничения ударного тока КЗ повышается на 13,08%. Температура максимального нагрева обмоток, при меньшем критическом токе, уменьшилась на 1%. Оба этих фактора объясняются тем, что при $I_k = 220$ А, ток КЗ достигает критической величины быстрее, чем при $I_k = 439$ А, тем самым резкое повышение сопротивления обмоток происходит раньше. В то же время, снижение критического тока значительно снижает пропускную способность трансформатора.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния переходных электрохимических процессов в электроэнергетической системе (ЭЭС) на тепловую устойчивость ВСП обмоток и ВСП трансформаторов на динамическую устойчивость режима ЭЭС с симуляцией процессов в среде Matlab/Simulink.

Исследования включали моделирование переходных процессов в ЭЭС генератор-трансформатор-линия-шины бесконечной мощности (ШБМ) (рис. 17). Рассмотрены два варианта: ЭЭС с трансформатором традиционного исполнения типа ТРДЦН-100000/220; ЭЭС с ВСП трансформатором.

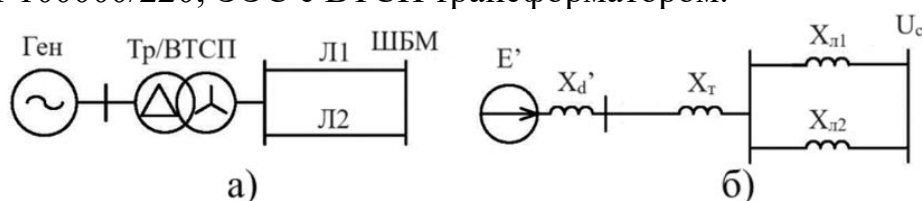


Рисунок 17 – Исследуемая система: а) принципиальная схема; б) схема замещения

Рассматривалось одно из основных расчетных возмущений – трехфазное короткое замыкание в начале одной из отходящих от шин с трансформатором линий электропередачи. Численное моделирование режима реализовано с помощью разработанной имитационной модели в ППК Matlab/Simulink (рис. 18), обеспечивающей численное решение электрохимических и тепловых переходных процессов.

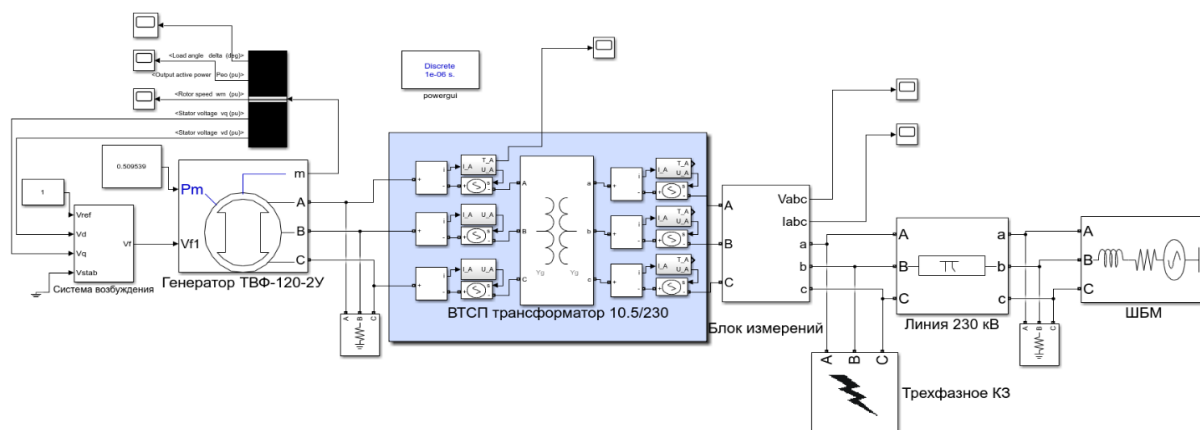


Рисунок 18 - MATLAB/Simulink модель исследуемой сети

Силовая часть цифровой модели включает в себя генератор ТВФ-120-2У, ВТСП трансформатор 10,5/230 кВ мощностью 100 МВА (ТРДЦН-100000/220), линию электропередачи длиной 100 км и шины бесконечной мощности. Измерительная часть модели состоит из блоков, обеспечивающих измерение следующих величин: токи и напряжения, температура ВТСП обмоток, выдаваемая генератором активная мощность, относительный угол ротора, скорость ротора. Моделирование трехфазного короткого замыкания осуществляется с использованием блока переключателя.

Генератор ТВФ-120-2У моделируется полными уравнениями Парка-Горева и уравнением движения ротора. ВТСП трансформатор представлен предложенной в предыдущих главах математической моделью.

В исследуемой ЭЭС генератор работает в нормальном режиме. Через 0,1 с происходит трехфазное короткое замыкание, которое самоустранивается через 0,2 с. Моделирование процесса проводилось для двух вариантов ЭЭС: при наличии в системе классического трансформатора ТРДЦН-100000/220 и ВТСП трансформатора. На рисунке 19 представлены графики токов в сети.

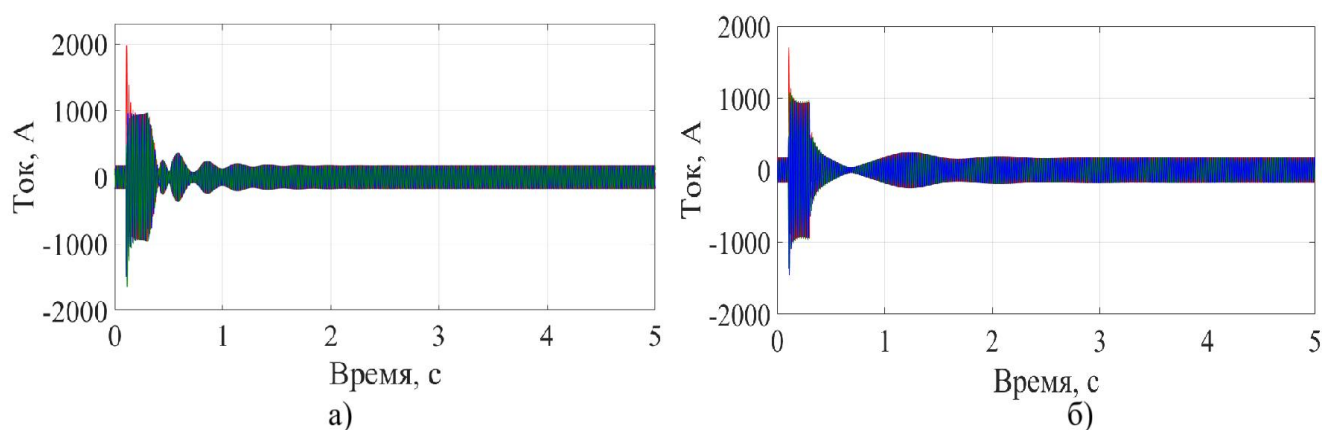


Рисунок 19 – Токи в ЭЭС при $K^{(3)}$ в момент перехода напряжения через 0 с:
а) с трансформатором ТРДЦН; б) с ВТСП трансформатором

Из представленных графиков переходных процессов (рис. 19, 20) видно, что в сети возникают затухающие колебания ротора генератора, обусловленные нарушением баланса активной мощности (моментов ротора) генератора при возникновении КЗ. В ЭЭС с классическим трансформатором ТРДЦН-100000/220 после начала КЗ ротор генератора ускоряется, после устранения КЗ тормозится и переходит в режим затухающих качаний.

В случае ВТСП трансформатора в электрической сети, в начале КЗ происходит торможение ротора, после отключения КЗ ротор начинает ускоряться и также возникает режим затухающих качаний ротора. Этот процесс объясняется резким повышением активного сопротивления ВТСП трансформатора, которое появляется при превышении критического значения тока сверхпроводника. В рассмотренной сети, активное сопротивление трансформатора составило 25 Ом.

На рисунке 20 приведены расчетные графики взаимного угла ротора. По результатам моделирования видно, что амплитуда изменения относительного угла ротора уменьшается в 2 раза в случае использования ВТСП трансформатора

значительно ниже, что говорит о положительном влиянии ВТСП трансформатора на динамическую устойчивость энергосистемы.

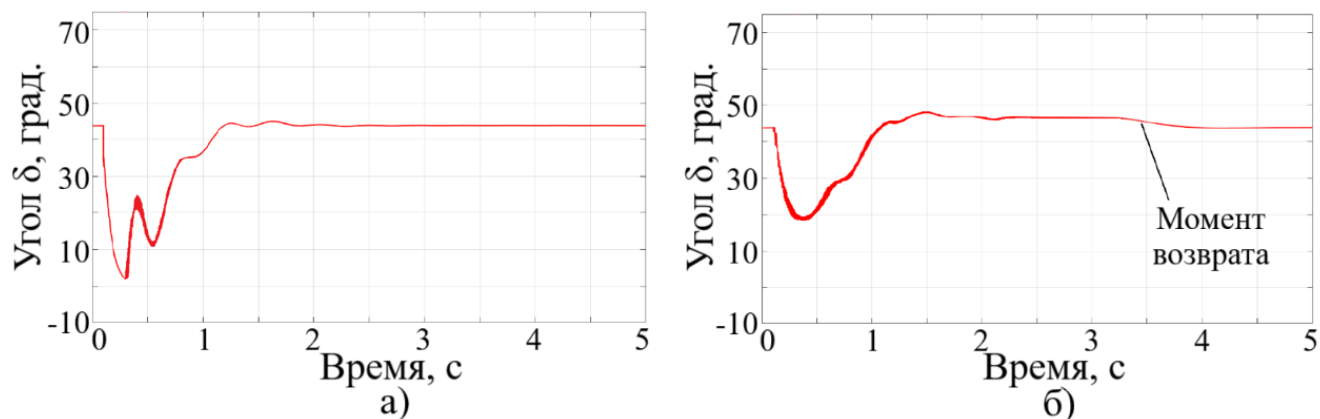


Рисунок 20 – Относительный угол ротора генератора: а) для сети с трансформатором ТРДЦН; б) для сети с ВТСП трансформатором

Разработанная модель также позволила получить графики изменения температуры обмоток трансформатора во времени (рис. 21), необходимые для анализа теплового воздействия тока КЗ на сверхпроводящие обмотки трансформатора.

Температура обмоток во время КЗ достигает 148 К, и через 3,2 с после устранения КЗ трансформатор успешно возвращается в сверхпроводящее состояние. Если же увеличить длительность КЗ до 0,3 с, то по графику изменения температуры (рис. 21б) наблюдается тепловой не возврат, что вызовет повреждение обмоток ВТСП трансформатора при длительности такого режим свыше 5 с.

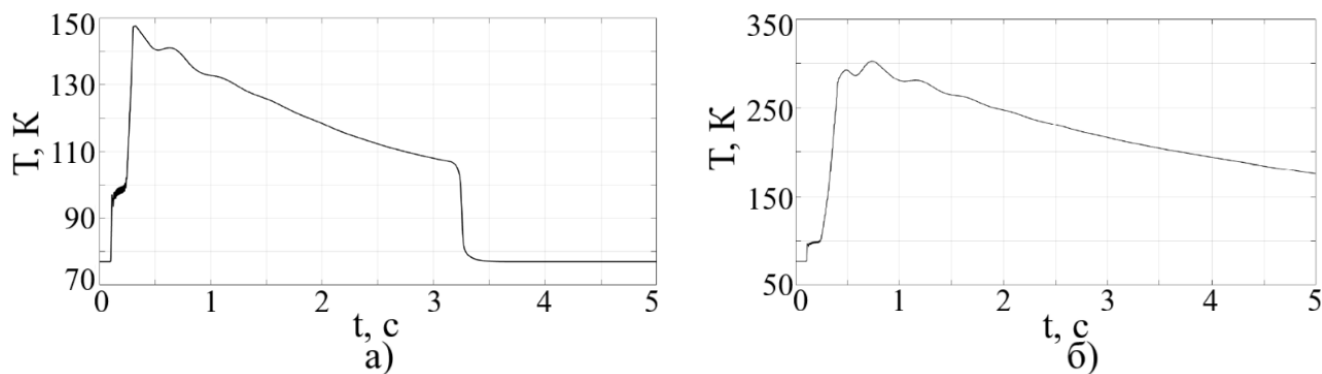


Рисунок 21 - Температура обмотки ВТСП трансформатора: а) при длительности КЗ 0,2 сек; б) при длительности КЗ 0,3 сек

Смоделирован эксперимент с теми же исходными параметрами и активным токоограничивающим сопротивлением равным 50 и 100 Ом. Результаты моделирования переходных процессов показали, что в случае повышения активного сопротивления до 50 Ом, коэффициент ограничения тока увеличивается с 1,2 до 1,36. При этом, с ростом активного сопротивления ротор начинает тормозиться в большей степени, что негативно сказывается на динамической устойчивости генератора, поскольку колебания скорости и угла ротора увеличиваются после отключения КЗ.

В экспериментах с значением активного сопротивления 100 Ом были получены графики тока в ЭЭС (рис. 22), которые показывают, что вследствие

чрезмерного торможения ротора генератор выпадает из синхронизма, что является недопустимым с точки зрения безопасности функционирования энергосистемы.

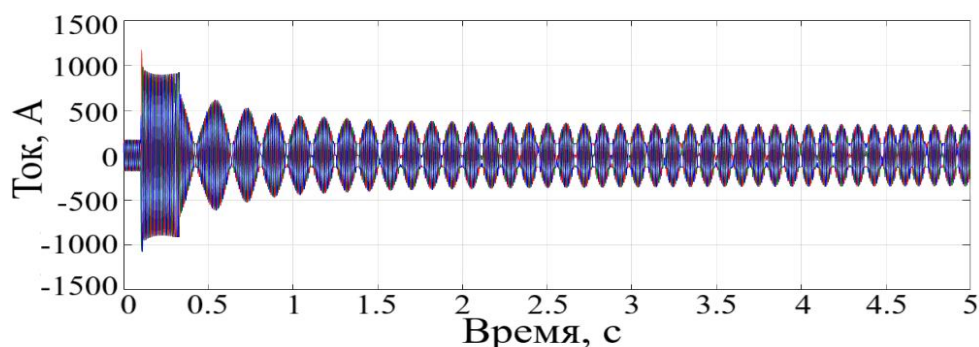


Рисунок 22 – Ток при активном сопротивлении ВТСП трансформатора 100 Ом

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Основные результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ проблемы ограничения токов короткого замыкания, которая возникает в электрических сетях классов напряжений 10 - 220 кВ в связи с увеличением нагрузок потребителей, мощности генерирующих объектов и развитием электросетевого комплекса. Рассмотрены особенности и последствия возникновения аварийных режимов в электрических сетях, влияние токов КЗ на сеть, а также дана характеристика существующих способов ограничения токов КЗ.

2. Разработана математическая модель режимов ЭЭС, способная рассчитывать электромагнитные, электромеханические и тепловые переходные процессы при включении ВТСП трансформатора и при КЗ с учетом критических параметров сверхпроводника, электрических и магнитных параметров элементов ЭЭС, особенности охлаждения обмоток ВТСП трансформатора жидким азотом.

3. Сконструировано два образца силовых ВТСП трансформаторов с функцией ограничения тока. Доказано, что трансформаторы с ВТСП обмотками можно применять для ограничения токов короткого замыкания в электроэнергетических системах. Полученные в работе результаты теоретических и экспериментальных исследований согласуются с погрешностью 1,99%, что позволило верифицировать разработанную математическую модель. Установлено снижение ударного тока КЗ в 2,95 раза.

4. При включении ВТСП трансформатора в сети возникает пусковой ток, способный значительно превысить величину критического тока сверхпроводника, что вызывает потерю сверхпроводящего состояния обмоток. Длительная потеря сверхпроводимости под нагрузкой, способна привести к термическому разрушению обмотки.

5. Выявлено влияние показателя степени ВАХ обмоток 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.

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

7. Предложен критерий возврата сверхпроводящего состояния ВТСП трансформатора по величине кратности тока КЗ к номинальному току.
8. Предложены меры по обеспечению тепловой устойчивости обмоток при ограничении тока КЗ и включении ВТСП трансформатора.
9. Разработана численная имитационная модель в среде Matlab/Simulink, позволяющая совместно оценить электромеханический и тепловой переходный процессы в ЭЭС с ВТСП трансформатором при коротком замыкании.
10. Динамическая устойчивость зависит от величины активного сопротивления ВТСП трансформатора, которое возникает в момент ограничения тока и компенсирует потерю мощности генератора при КЗ. Появление активного токоограничивающего сопротивления большой величины приводит к нарушению динамической устойчивости параллельного режима синхронных генераторов в электроэнергетической системе.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях (из перечня ВАК):

1. Иванов Д.М. Электротепловые переходные процессы в сети с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором с функцией токоограничения / В.З. Манусов, Д.М. Иванов // Электричество. – 2022. – №1. – С. 9-17.
2. Иванов Д.М. Определение основных параметров высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора с функцией токоограничения / Манусов В.З., Иванов Д.М., Семенов А.В., Боруш О.В. // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13. - №3(51). – С. 25-38.

Публикации в научных изданиях, входящих в международные наукометрические базы Scopus / Web of Science:

3. Ivanov D.M. Modeling and Experimental Study of the Inrush Current of a HighTemperature Superconducting Transformer / Manusov V.Z., Ivanov D.M., Ivanova E.V. // Problems of the Regional Energetics. 2024. – Vol. 62. – No 2. P. 46-56.
4. Ivanov D.M. Study of Electromagnetic and Thermal Transients in a High-temperature Superconducting Transformer during a Short Circuit / Manusov V.Z., Ivanov D.M. // Problems of the Regional Energetics. 2023. – Vol. 58. – No 2. P. 1-12.
5. Ivanov D.M. Methodology for determining the parameters of high-temperature superconducting power transformers with current limiting function / Manusov V.Z., Ivanov D.M., Semenov A.V., Ivanov G.V. // International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2023. – Vol. 13. – N(1). – P. 238-248
6. Ivanov D. M. Analysis of Transient Processes in a Three-Phase Single-Machine System with a High- Temperature Superconducting Transformer / V. Z. Manusov, D. M. Ivanov, A. V. Semenov // 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC), Novosibirsk, Russia, 13-15 November 2021, pp. 13-18.
7. Ivanov D. M. Experimental Studies of a High-temperature Superconducting Prototype Transformer with Current Limiting Function / D. M. Ivanov, V. Z. Manusov, A. V. Semenov // 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russia, 12-14 March 2020, DOI: 10.1109/REEPE49198.2020.9059233. P. 97-102.

8. Ivanov D. M. Analyses of Electrical Parameters of Power Transformers with Superconducting Windings / Ivanov D.M., Manusov V.Z., Nazarov M.K. // 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2019: Erlagol, Altai, 29 June – 3 July 2019. – P. 547-551.

Публикации в других российских изданиях:

9. Иванов Д.М. Исследование броска тока намагничивания в высокотемпературном сверхпроводящем трансформаторе // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 04-08 декабря 2023 г. В 11 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023 – Ч. 4. Секция «Системы электроснабжения, электротехнические системы и электрические сети». – С. 21-25.

10. Иванов Д. М. Экспериментальное исследование высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора с функцией токоограничения / Манусов В.З., Иванов Д.М., Семенов А.В. // XI Международная научно-техническая конференция: Электроэнергетика глазами молодежи, Ставрополь, 15-17 сентября 2020 г. В 2 т. – Изд-во Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. – Т.1.- С. 222 – 225.

11. Иванов Д.М. Инновационная технология повышения энергоэффективности автономных систем энергоснабжения на водном транспорте / В.З. Манусов, Т.И. Зайко, Б.В. Палагушкин, Д.М. Иванов, И.А. Мартынов, А.В. Семенов, С.Н. Реутов // Речной транспорт (XXI Век). – 2019. - №4(92). – С. 53-56.

12. Иванов Д. М. Исследование токоограничивающей функции силового трансформатора со сверхпроводящими обмотками / Д. М. Иванов, В.З. Манусов // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 02-06 декабря 2019 г. В 9 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019 – Ч. 4. Секция «Системы электроснабжения, электротехнические системы и электрические сети». – С. 31-35.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ:

13. Иванов Д. М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024685363. Российская Федерация. Программа расчета электромагнитных и тепловых переходных процессов в высокотемпературном сверхпроводящем трансформаторе при коротком замыкании в электрической сети / Иванов Д.М., Манусов В.З. Дата гос. регистрации 30.10.2024.

14. Иванов Д. М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025618801. Российская Федерация. Программа расчета электромеханических и тепловых переходных процессов в электроэнергетической системе, включающей в себя высокотемпературный сверхпроводящий трансформатор при коротком замыкании в электрической сети / В.З. Манусов, Д.М. Иванов. Дата гос. регистрации 12.08.2025.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, тел./факс (383) 346-08-57.

Формат 60 x 84 1/16. Объем 1.25 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № Р-04795. Подписано в печать 17.10.2025 г.