

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Манусов Вадим Зиновьевич

Новосибирск - 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 6 |
| 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ | 14 |
| 1.1 Особенности и последствия возникновения коротких замыканий в электрических сетях..... | 14 |
| 1.2 Обзор современных токонесущих элементов и проводников на основе высокотемпературных сверхпроводящих материалов..... | 19 |
| 1.3 Сверхпроводящие токоограничители: особенности конструкции, виды, принцип действия..... | 25 |
| 1.3.1 Сверхпроводящие токоограничители резистивного типа | 26 |
| 1.3.2 Сверхпроводящие токоограничители индуктивного типа | 28 |
| 1.4 Актуальное состояние разработок в области высокотемпературных сверхпроводящих силовых трансформаторов..... | 32 |
| 1.4.1 Токоограничивающая функция высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора..... | 32 |
| 1.4.2 Мировые исследования и разработки высокотемпературных сверхпроводящих трансформаторов | 35 |
| Выводы по главе 1..... | 42 |
| 2 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ | 44 |
| 2.1 Постановка задачи..... | 44 |
| 2.2 Основные положения теории сверхпроводимости, применяемые к задаче исследования..... | 45 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.3 | Экспериментальный прототип силового однофазного высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора | 47 |
| 2.3.1 | Обмотки | 48 |
| 2.3.2 | Магнитопровод..... | 49 |
| 2.3.3 | Криостат..... | 51 |
| 2.3.4 | Параметры физической модели однофазного высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора | 53 |
| 2.4 | Математическая модель электромагнитных и тепловых переходных процессов в однофазной сети с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором | 54 |
| 2.5 | Имитационная модель электрической сети с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором, разработанная в среде MATLAB/Simulink | 64 |
| 2.6 | Моделирование процесса ограничения тока короткого замыкания в сети с экспериментальным прототипом высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора | 71 |
| 2.7 | Подтверждение адекватности разработанной модели физическими экспериментами..... | 76 |
| 2.8 | Экспериментальные исследования и математическое моделирование броска тока намагничивания в высокотемпературном сверхпроводящем трансформаторе при коммутации электрической сети | 80 |
| | Выводы по главе 2..... | 90 |
| 3 | ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ | 93 |
| 3.1 | Постановка задачи..... | 93 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.2 | Параметры силовых высокотемпературных сверхпроводящих трансформаторов с функцией токоограничения, влияющие на режим электрической сети | 94 |
| 3.2.1 | Плотность тока и магнитная индукция сердечника | 94 |
| 3.2.2 | Потери в высокотемпературном сверхпроводящем трансформаторе..... | 96 |
| 3.2.3 | Критические параметры высокотемпературных сверхпроводящих лент и токоограничивающая функция | 100 |
| 3.3 | Matlab/Simulink модель трехфазной сети с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором | 102 |
| 3.4 | Исследование возможности ограничения ударных токов для различных типов короткого замыкания | 108 |
| 3.4.1 | Ограничение токов трехфазного короткого замыкания | 109 |
| 3.4.2 | Ограничение токов двухфазного короткого замыкания | 111 |
| 3.5 | Анализ влияния различных параметров на эффективность токоограничивающей функции высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора..... | 115 |
| 3.5.1 | Исследование влияния показателя вольт-амперной характеристики высокотемпературной сверхпроводящей ленты на уровень ограничения тока короткого замыкания..... | 115 |
| 3.5.2 | Автоматическое повторное включение в электрической сети класса напряжения 10 кВ с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором | 119 |
| 3.6 | Анализ эффективности ограничения тока короткого замыкания при использовании высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора с расщепленной обмоткой..... | 122 |
| | Выводы по главе 3..... | 125 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 4 | ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОМАШИННОЙ СИСТЕМЕ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ | 126 |
| 4.1 | Постановка задачи..... | 126 |
| 4.2 | Качественный анализ влияния высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора на динамическую устойчивость | 126 |
| 4.3 | Matlab/Simulink модель электромеханических и тепловых переходных процессов в системе с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором | 132 |
| 4.4 | Исследование переходных процессов в одномашинной электроэнергетической системе с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором с помощью Matlab/Simulink модели..... | 134 |
| | Выводы по главе 4..... | 142 |
| | ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 144 |
| | СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ..... | 147 |
| | СПИСОК ТЕРМИНОВ | 148 |
| | СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 151 |
| | ПРИЛОЖЕНИЕ «А» АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ..... | 163 |
| | ПРИЛОЖЕНИЕ «Б» СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ | 167 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Современные энергосистемы Российской Федерации характеризуются устойчивым ростом электропотребления, что обуславливает развитие генерирующих мощностей. Согласно «Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации» (Распоряжение Правительства РФ от 3.04.2013 г. № 511-Р) доля распределительных электрических сетей, выработавших свой нормативный срок, составила 50%, что свидетельствует о необходимости модернизации, повышения энергоэффективности и обновления электрооборудования всего электросетевого комплекса. Важным требованием, предъявляемым к системам электроснабжения нашей страны, является поиск экономически и технически оправданных методов и средств по снижению потерь в электрических сетях. Передача электрической энергии на большие расстояния, осуществляется многоступенчатой системой трансформации напряжения, при этом на силовые трансформаторы приходится значительная часть потерь в электрических сетях, что стимулирует интенсивные поиски путей их снижения.

Наряду с этим в электроэнергетических системах все более остро стоит вопрос координации и ограничения уровней токов короткого замыкания, которые оказывают существенное влияние на выбор защитно-коммутационной аппаратуры, безопасность и устойчивость функционирования электросетевого, подстанционного и станционного высоковольтного электрооборудования. Эта проблема в значительной степени обусловлена тем, что при сроке службы трансформаторного и иного электрооборудования в течение 20-25 лет, оно продолжает эксплуатироваться еще десятилетиями. За этот период электрические нагрузки существенно возрастают и вместе с ними токи короткого замыкания (КЗ) в электрических сетях. Известно, что наиболее критичным в этом случае является ударное значение тока короткого замыкания, которое оказывает наибольшее электродинамическое воздействие на витки обмоток трансформаторов и электрических машин, электрические шины

распределительных устройств подстанций и другие токопроводящие элементы. 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 удельная высокая 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 работы 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 работы 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.

На основании вышесказанного можно считать, что исследование влияния ВТСП трансформаторов на переходные и аварийные режимы работы электроэнергетической системы, с целью достижения эффективного и безопасного ограничения тока КЗ, повышения энергоэффективности и

устойчивости электроэнергетической системы, является весьма актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в разработку и исследования влияния высокотемпературных сверхпроводящих токоограничивающих устройств и трансформаторов на режимы работы 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» (Приложение А).

Теоретическая значимость:

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

2. Разработанные математические модели 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, возврата 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.

Степень достоверности 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 13 научных работ, из них 2 статьи в журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК; 6 публикаций в международных наукометрических базах Scopus и Web of Science и 4 работы в прочих изданиях. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора составил 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. 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.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ТОКОГРАНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

1.1 Особенности и последствия возникновения коротких замыканий в электрических сетях

К возникновению переходных процессов в электроэнергетических системах (ЭЭС) могут привести различные причины. В нормальном режиме энергосистемы к ним относятся включения и отключения источников питания, нагрузок, отдельных электрических цепей, проведение испытаний электрооборудования и т.д. В аварийном режиме переходный процесс возникает при коротких замыканиях, нарушении синхронизма электрических машин, обрывах фазы и т.д.

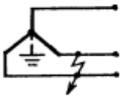
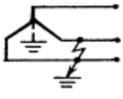
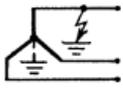
Переходные процессы, вызывающие аварийный режим электрической системы, весьма опасны и не желательны. Возникающие при этом броски тока и перенапряжения, кратно превышающие значения нормального режима, могут вызвать недопустимый нагрев токоведущих частей электрооборудования, разрушение изоляции, механические повреждения частей электрических машин.

Наиболее критичное электродинамическое воздействие на обмотки электрических машин и трансформаторов, электрические шины распределительных устройств подстанций и другие токопроводящие элементы оказывает ударный ток короткого замыкания. Короткое замыкание (КЗ) — режим, при котором происходит соединение проводников общей электрической сети, находящихся под разным напряжением, через малое переходное сопротивление, не предусмотренное нормальным режимом. Этот режим является основной причиной аварийных переходных процессов в ЭЭС [1, 2].

В системах электроснабжения 6 (10) кВ замыкание провода на землю называется однофазным замыканием на землю. Эти системы выполняются, как правило, с изолированной нейтралью. Ток замыкания на землю протекает от

повреждённого провода в землю и возвращается к источнику через ёмкости между проводами неповреждённых фаз и землёй. Симметричное трёхфазное КЗ самый редкий вид КЗ, но его нельзя списывать со счетов, поскольку оно практически во всех случаях имеет максимальный ток и является самым опасным видом короткого замыкания. Очень часто КЗ возникает вследствие пробоя изоляции токоведущих частей и элементов сети и является случайным процессом. В электрической системе различают четыре вида КЗ, они представлены в таблице 1.1 [1, 2].

Таблица 1.1 - Виды коротких замыканий в системе электроснабжения и их обозначения

| Схема короткого замыкания | Сеть с глухозаземленной или эффективно-заземленной нейтралью | Сеть с незаземленной или резонансно-заземленной нейтралью | Частота появления, % |
|---|--|---|----------------------|
|  | Трёхфазное КЗ $K^{(3)}$ | | 1–7 |
|  | Двухфазное КЗ $K^{(2)}$ | | 2–13 |
|  | Двухфазное КЗ на землю $K^{(1.1)}$ | | 5–20 |
|  | Однофазное КЗ $K^{(1)}$ | Однофазное замыкание на землю | 60–92 |

Короткие замыкания появляются при изменении параметров системы и всегда ведут к нарушению допустимых режимных параметров, что несёт за собой следующие последствия [3, 4]:

- Многократное возрастание силы тока на поврежденном участке электрической сети. При трёхфазном КЗ вблизи источников ЭДС общее эквивалентное сопротивление электрической сети уменьшается, что приводит к повышению тока в цепи в десятки раз по сравнению с номинальными

величинами. Такие высокие значения тока КЗ могут вызвать механические и тепловые повреждения электрооборудования;

- *Нарушение устойчивости работы элементов СЭС и электроэнергетической системы.* Резкое снижение напряжения в электрической сети приводит к опрокидыванию асинхронных двигателей. Зависимость механического момента вращения от квадрата напряжения обуславливает остановку двигателей в течение одной-двух секунд даже при удаленном КЗ, что вызывает нарушение технологического процесса. Кроме того, пониженное напряжение негативно влияет на работу осветительных приборов и других электротехнологических установок. При возникновении в электроэнергетической системе слишком «долгого» КЗ, возможно нарушение устойчивости параллельной работы синхронных генераторов и электростанций, что считается наиболее опасным последствием КЗ.

- *Тепловое и электродинамическое воздействия.* Значительные тепловыделения, вызванные токами КЗ, приводят к нарушению термической стойкости электрооборудования и увеличению пожарной опасности. Последствиями КЗ являются: разрушение изоляции проводников, нарушение механической прочности контактных соединений, воспламенение горючих изоляционных материалов. Появление больших электродинамических усилий в начальной стадии переходного процесса между токоведущими частями, вызванных ударным током КЗ, приводит к механическому повреждению и разрушению проводников, обмоток электрических машин, токоведущих шин, креплений и т.д.

- *Наведение электромагнитных помех на линии связи, устройства релейной защиты и автоматики.* Во время короткого замыкания электрическая цепь представляет собой сильный колебательный контур. В этой связи, влияние на соседние контуры выражается в наведении электромагнитных помех, обусловленных индуцированными ЭДС, вследствие чего возможно срабатывание релейной защиты и автоматики, отключение неповрежденных

электроустановок. Такое влияние может нанести ущерб электрооборудованию вторичных цепей [3, 4].

Нетрудно заметить, что короткие замыкания в сети могут не только нарушать нормальный режим ЭЭС, но и угрожать жизни человека, поэтому проблема ограничения этих токов всегда остаётся актуальной и требует глубокого изучения.

На сегодняшний день известны меры и устройства, способные ограничивать токи КЗ: секционирование электрических сетей, применение трансформаторов с расщепленными обмотками низкого напряжения, установка токоограничивающих реакторов и безынерционных токоограничивающих устройств [4].

Секционирование электрической сети позволяет снизить токи КЗ в электрических сетях до двух раз. В месте секционирования образуется так называемая точка деления сети, при этом в энергосистеме с высокими значениями токов КЗ таких точек может быть множество. Главным недостатком данного метода является увеличение потерь в линиях электропередачи и трансформаторах в нормальном режиме, поскольку распределение потоков мощности при этом может быть неоптимальным. В связи с этим, решение о секционировании должно быть обосновано технико-экономическим расчетом [5].

Самыми известными и широко применяемыми устройствами являются *токоограничивающие реакторы*, которые могут иметь различные характеристики и конструкцию. Рассмотрим наиболее известные из них, на рисунке 1.1 представлены схемы включения реакторов [4, 5].

Реакторы с линейной характеристикой представляют собой индуктивную катушку без сердечника, которую последовательно включают в электрическую цепь. Благодаря отсутствию магнитопровода реактор в нормальном режиме сети обладает индуктивным сопротивлением, которое не зависит от протекающего тока. Поскольку реакторы включают последовательно, то в нормальном режиме они имеют потери активной мощности, падение напряжения, а также потери

реактивной мощности и напряжения. Для устранения последних двух недостатков используется так называемый сдвоенный реактор. В нормальном рабочем режиме между каждой ветвью реактора существует взаимная магнитная связь, которая сохраняет токоограничивающую способность и при этом снижает потери напряжения.

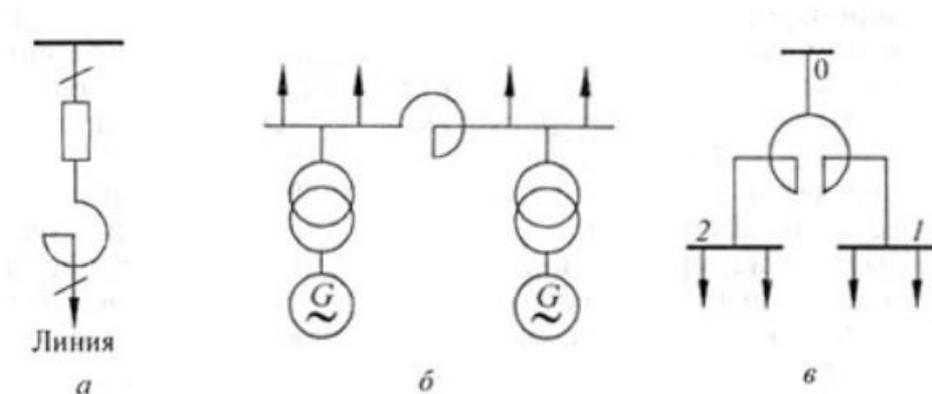


Рисунок 1.1 – Схемы включения реакторов:

(а) линейный; (б) секционный; (в) сдвоенный

Среди реакторов с нелинейной характеристикой различают насыщающийся реактор, в котором при протекании тока увеличивается его сопротивление за счёт эффекта насыщения магнитопровода, а также управляемый реактор, в котором существует подмагничивание магнитопровода с помощью поля постоянного тока, вследствие чего изменяется его сопротивление.

В сетях низкого напряжения широко используется *расщепление обмоток трансформаторов* и автотрансформаторов, поскольку этот способ позволяет снизить токи короткого замыкания, используя тот же принцип, что и в сдвоенных реакторах. Применение таких трансформаторов нашло в системах собственных нужд электростанций, а также на подстанциях предприятий.

В электроэнергетике остаются востребованными токоограничивающие устройства, позволяющие ограничить токи короткого замыкания за очень короткое время, поскольку наиболее критичное электродинамическое воздействие на обмотки электрических машин и трансформаторов, электрические шины распределительных устройств подстанций и другие

токопроводящие элементы оказывает ударный ток КЗ. В связи с этим зачастую приходится завышать характеристики защитно-коммутационного оборудования и других элементов электросетевого комплекса для соответствия токам КЗ [4,5].

Сегодня создаются и внедряются в реальный электросетевой комплекс быстродействующие токоограничивающие устройства на основе высокотемпературной сверхпроводимости, позволяющие мгновенно ограничивать ударный ток КЗ, не внося при этом дополнительные потери в электрическую сеть в нормальном режиме.

Внедрение и успешная эксплуатация сверхпроводящих ограничителей тока за последние 8 лет открыло новые возможности модернизации и повышения надежности действующих электрических сетей [6]. Разработка новых ВСП токоограничивающих устройств, в том числе ВСП трансформаторов с функцией ограничения тока КЗ, является одним из наиболее перспективных направлений развития электроэнергетики и требует исследования их влияния на режимы электроэнергетической системы.

1.2 Обзор современных токонесущих элементов и проводников на основе высокотемпературных сверхпроводящих материалов

В 1908 г. голландским физиком Х. Камерлинг-Оннесом был впервые получен жидкий гелий, что позволило достичь рекордно низкой температуры в 4,2 К. Данное достижение создало экспериментальные условия для открытия им же в 1911 г. явления сверхпроводимости [7]. В последующие десятилетия сверхпроводимость была обнаружена во многих металлических элементах и сплавах. Были экспериментально подтверждены и изучены присущие сверхпроводящему состоянию фундаментальные физические свойства, такие как совершенный диамагнетизм, эффект Джозефсона и т.д. [8, 9]. Результаты этих исследований легли в основу практического применения эффекта сверхпроводимости в различных ключевых технологических областях.

Открытие высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в 1986 году Беднорцем и Мюллером [10] породило большие надежды на широкое распространение сверхпроводниковых устройств. Сегодня мы видим, что разработка технологии ВТСП потребовала больше времени и усилий, чем многие предполагали. Преодоление «азотного барьера» создало принципиально новые возможности для практического применения сверхпроводимости в электроэнергетике. Главная из них состоит в повышении рабочих температур сверхпроводящих устройств от единиц градусов Кельвин до значений 40 – 120 К. Преимуществом высокотемпературных сверхпроводников является использование в виде криогенной среды – жидкого азота. Он является довольно дешевым и нетребовательным в получении и хранении продуктом по сравнению с жидким гелием (средой для охлаждения низкотемпературных сверхпроводников). С появлением ВТСП, количество исследований и разработок электроэнергетического оборудования: трансформаторов, токоограничителей, кабелей, накопителей, двигателей резко возросло.

Сегодня открыты десятки видов оксидных соединений, сохраняющих сверхпроводящее состояние при температурах выше 77 К. Однако, выбор подходящих ВТСП материалов для применения в электроэнергетике основан на множестве критериев и параметров, среди которых температура перехода материала в сверхпроводящее состояние (критическая температура T_k) не является главенствующим. Многие высокотемпературные сверхпроводники с высокой T_k , при рабочей температуре не показывают высокую критическую плотность тока и механическую прочность, что сильно затрудняет их применение при создании электрооборудования. Кроме того, некоторые образцы с подходящими свойствами имеют сложную технологию производства, содержат токсичные и опасные компоненты (таллий, ртуть). В результате, ВТСП-материалы, имеющие практическое значение, в основном включают BSCCO ($T_k = \sim 90-110$ К, известный как первое поколение ВТСП материалов, например, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (BSCCO-2212) и $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (BSCCO-2223)) и

REBCO ($T_c = \sim 93$ К, второе поколение ВТСП материалов, например, $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO)) [11-13].

Сегодня сверхпроводящие токонесущие элементы изготавливают в виде композитных ВТСП проводов или лент с поликристаллической структурой. Современные ВТСП провода, производящиеся сегодня во всем мире, относятся к сверхпроводникам второго рода. Их отличие от сверхпроводников первого рода заключается в характерном фазовом переходе. Из рисунка 1.2 видно, что фазовый переход проводника из сверхпроводящего состояния в нормальное происходит через промежуточное состояние, ограниченное критическими полями B_{K1} и B_{K2} [8].



Рисунок 1.2 - Фазовая диаграмма сверхпроводников второго рода

По сравнению с BSCCO, REBCO имеет более высокую критическую плотность тока (J_K) и однородное магнитное поле. REBCO также имеет более высокую T_K , чем сверхпроводники на основе MgB_2 и Fe, и не содержит токсичных элементов по сравнению с другими типами сверхпроводников на основе оксида меди (например, Hg и Tl). Трехмерная диаграмма T_K , верхнего критического магнитного поля (B_{K2}) и J_K различных сверхпроводящих материалов (включая NbTi, MgB_2 , Bi2223 и YBCO) показана на рисунке 1.3 [11]. Видно, что ленты YBCO имеют более высокие J_K в большем диапазоне температур и магнитных полей. Поэтому ВТСП ленты второго поколения на основе оксида иттрия-бария-меди наиболее перспективны для применения в

электроэнергетике и являются одним из широко и глубоко исследованных типов высокотемпературных сверхпроводящих материалов [11, 14].

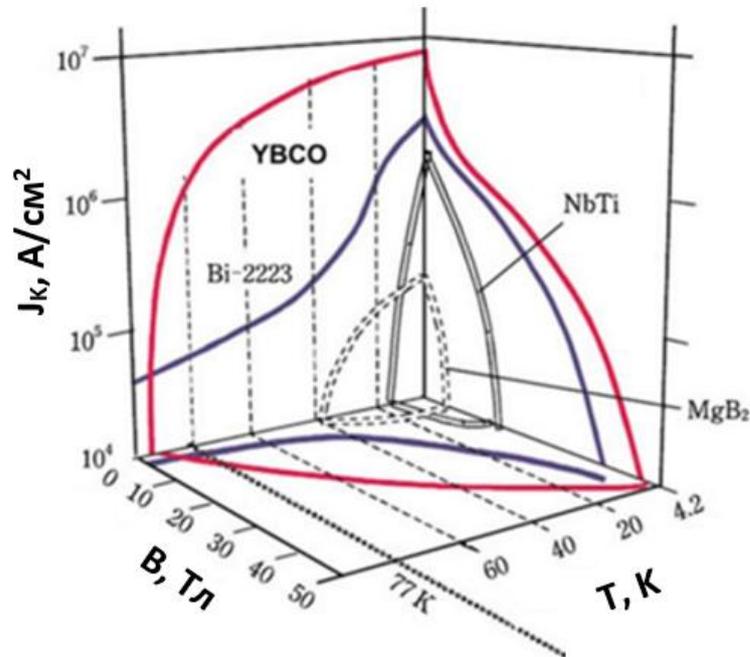


Рисунок 1.3 - Трехмерная диаграмма критической температуры (T_c), верхнего критического магнитного поля (B_{c2}) и критической плотности тока (J_c) различных сверхпроводящих материалов

Для проектирования и разработки электрических машин и кабелей на основе явления сверхпроводимости используются ВТСП провода второго поколения. Они представляют собой многослойные провода, производимые в виде лент на основе иттриевой керамики Y-Ba-Cu-O (YBCO) с критической температурой 92 К. Как известно, наряду с высокой плотностью критического тока, достигающей $1000 A/mm^2$ при 77 К, эти материалы демонстрируют рекордную среди всех прочих сверхпроводников устойчивость в магнитных полях.

Типичный пример архитектуры сверхпроводящей ленты второго поколения, разработанной в российской компании «SuperOx», показан на рисунке 1.4 [15]. В этом контексте термин «архитектура» подразумевает последовательность оксидных слоев и комбинацию связанных процессов изготовления, основанных на методах физического и химического осаждения.

Относительно сложная последовательность оксидных буферных слоев между субстратом из хастеллоя и сверхпроводящим материалом служит двум основным целям: (1) буферные слои действуют как диффузионный барьер для предотвращения загрязнения сверхпроводящего материала металлами из сплава подложки и/или низших буферных оксидов; (2) буферные оксиды инициируют и переводят двухосную текстуру, необходимую для формирования высокотекстурированных сверхпроводящих слоев для достижения наилучших функциональных свойств [15-17].

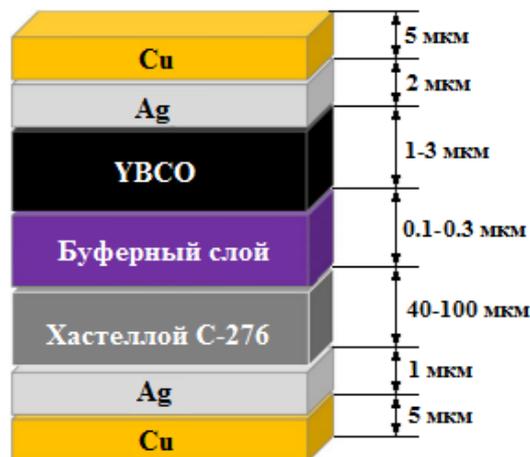


Рисунок 1.4 – Структура ВТСП ленты компании «SuperOx»

Уникальная токонесущая способность ВТСП провода второго поколения обеспечивает широкий спектр его практического применения, некоторые из которых, например ограничители тока короткого замыкания и трансформаторы, уже приближаются к коммерциализации [18, 19]. В таблице 1.2 проведен сравнительный анализ ВТСП лент ведущих производителей [20-27]. При проектировании электротехнических ВТСП устройств, в частности токоограничителей и трансформаторов, в качестве криогенной среды используют жидкий азот. Поэтому параметры ВТСП лент второго поколения при сверхнизких температурах (4,2 К и 20 К) и высоких магнитных полях не рассматривались. В работе [20] с помощью экспериментов проведён анализ критических токов и показателя вольт-амперной характеристики для ВТСП лент

толщиной 4 мм. Полученные результаты можно использовать при моделировании поведения электротехнических устройств в различных режимах.

Таблица 1.2 - Параметры ВТСП лент в собственном поле при температуре 77 К

| Компания | Страна | Технология изготовления | Сверхпроводящий элемент | Ширина ленты, мм | Макс. длина ленты, м | Критический ток, А | Показатель ВАХ | Предел прочности на растяжение, МПа |
|------------------------------|----------------------|----------------------------|-------------------------|------------------|----------------------|--------------------|----------------|-------------------------------------|
| American Superconductor [16] | США | RABiTS + MOD | YBCO | 4 | 800 | ≥ 150 | - | 250 |
| | | | | 12 | | ≥ 300 | | |
| Fujikura [17] | Япония | IBAD/ Hot-wall heating PLD | GdBCO/ EuBCO+ BHO | 4 | 1040 | ≥ 165 | 27-35 | 650 |
| | | | | 12 | | ≥ 550 | | |
| Shanghai Superconductor [18] | Китай | IBAD/ PLD | YBCO/ EuBCO+ BHO | 4 | 1000 | ≥ 200 | 24-29 | 800 |
| | | | | 10 | | ≥ 520 | | |
| SuNAM [19] | Республика Корея | IBAD + RCE | GdBCO | 4 | 1000 | ≥ 200 | 26-33 | 500 |
| | | | | 12 | | ≥ 600 | | |
| SuperOx [20] | Российская Федерация | IBAD/ PLD | YBCO/ GdBCO | 4 | 900 | ≥ 200 | 30-35 | 600 |
| | | | | 6 | | ≥ 300 | | |
| | | | | 12 | | ≥ 700 | | |
| SuperPower [21] | США | IBAD/ MOCVD | YBCO/ GdBCO | 4 | 1311 | ≥ 160 | 27-31 | 550 |
| | | | | 6 | | ≥ 260 | | |
| | | | | 12 | | ≥ 600 | | |
| THEVA [22] | Германия | IBAD/ PLD | GdBa-CuO | 4 | 500 | ≥ 170 | - | 500 |
| | | | | 12 | | ≥ 600 | | |

Стоимость материала для ВТСП проводов определяется исключительно технологией изготовления (около 99%). Однако в ближайшие несколько лет ожидается повсеместное снижение цены на ВТСП ленты, обусловленное увеличением объема производства и применением более эффективных технологий изготовления провода. Данная тенденция позволит повсеместно

повысить спрос на сверхпроводящее электротехническое оборудование и ускорить его массовое внедрение в электрические сети.

1.3 Сверхпроводящие токоограничители: особенности конструкции, виды, принцип действия

Стабильность и безопасность электроэнергетических систем приобретают все большее значение в связи с развитием электросетевого комплекса, увеличением спроса на электроэнергию, старением установленного оборудования. В настоящее время линии электропередачи подвергаются серьезной тепловой нагрузке при передаче большего количества мощности, гораздо большей, чем предполагалось при проектировании. Как правило, электрические сети уязвимы для коротких замыканий. Необходимо разработать новые защитные устройства и меры, чтобы избежать дорогостоящего или даже непоправимого ущерба. Модернизация, разработка и внедрение новых токоограничивающих устройств являются приоритетными задачами для развития, обеспечения устойчивости и надежности электроэнергетических систем.

По данным на 2025 год, разработки и исследования сверхпроводящих ограничителей тока КЗ являются наиболее востребованным направлением в области применения сверхпроводимости в электроэнергетике. Сверхпроводящий ограничитель тока КЗ на основе ВТСП реализует надежность и энергоэффективность электрической сети за счет эффективного и мгновенного ограничения токов короткого замыкания [28, 29].

В последнее время был разработан и проверен внутрисетевыми испытаниями ряд эффективных сверхпроводящих токоограничивающих устройств. Внедрены и успешно работают ВТСП токоограничители на различных классах напряжения 10-220 кВ.

Основные свойства и преимущества ВТСП токоограничивающих устройств в сравнении с известными моделями токоограничителей:

- ограничение величин ударного и установившегося токов КЗ до заданного уровня;
- быстродействие в диапазоне 2 – 3 мс;
- отсутствие влияния на нормальный режим электрической сети, прежде всего на уровень напряжения;
- отсутствие дополнительных потерь реактивной мощности;
- автоматическое срабатывание и восстановление после устранения аварии.

В данном разделе работы рассматриваются наиболее распространенные типы сверхпроводящих токоограничителей, разработанных как в России, так и за рубежом. В зависимости от конструкции и принципа действия сверхпроводящие ограничители тока КЗ разделяют на два основных вида: резистивные и индуктивные [30, 31]. Рассмотрим принцип действия каждого типа сверхпроводящего токоограничителя отдельно.

1.3.1 Сверхпроводящие токоограничители резистивного типа

Резистивный сверхпроводящий ограничитель тока (СОТ) представляет собой сверхпроводящий элемент, погруженный в криогенную среду, и параллельно подключенные к нему шунтирующий резистор или катушка индуктивности. Главным его конструктивными достоинствами являются небольшие масса-габаритные показатели и непосредственное включение сверхпроводящего устройства в схему с защищаемой нагрузкой. На рисунке 1.5 представлена схема конструкции СОТ резистивного типа.

Рассмотрим схему токоограничителя с резистором в качестве шунта (рисунок 1.6). Функционирование данного устройства базируется на способности высокотемпературных переходить в резистивное состояние при превышении критического значения тока, температуры или напряжённости магнитного поля. В сверхпроводящем состоянии, которое соответствует нормальному режиму энергосистемы, активное сопротивление ВТСП элемента ($R_{\text{ВТСП}}$) является ничтожно малым. Оно начинает резко увеличиваться после

того, как ток КЗ превысит критический ток сверхпроводника. После возникновения аварии ток КЗ протекает как в сверхпроводящем (СП) элементе, так и в резисторе. Шунтирующее сопротивление ограничивает ток и позволяет избегать перенапряжений, которые могут произойти, если сопротивление $R_{втсп}$ повышается слишком быстро. Кроме того, сопротивление R_c , параллельно соединенное со сверхпроводящим элементом, необходимо для того, чтобы защитить его от теплового воздействия тока КЗ во время работы в состоянии токоограничения. КЗ должно быть отключено выключателем S_1 , чтобы СП элемент не нагрелся выше максимальной температуры (после которой происходит процесс разрушения) и возвратился в сверхпроводящее состояние [32].

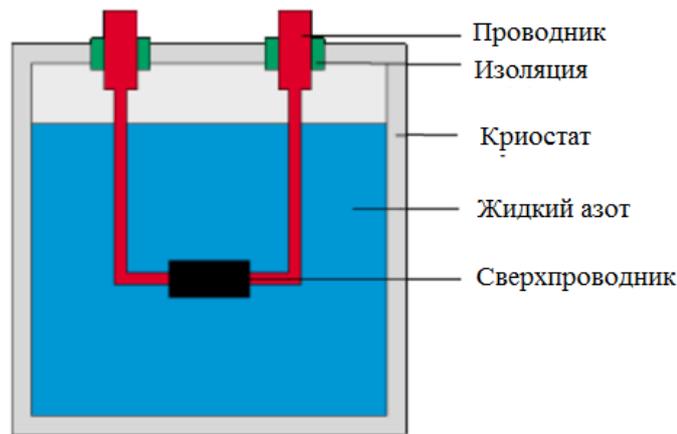


Рисунок 1.5 – Схема конструкции СОТ резистивного типа

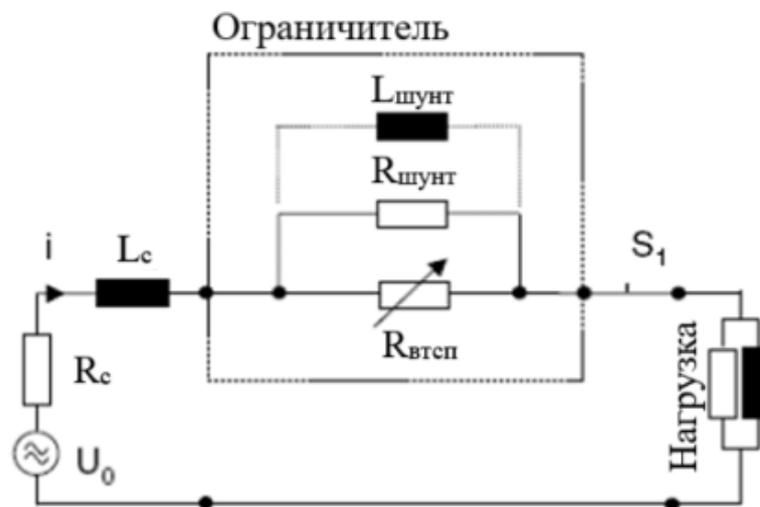


Рисунок 1.6 - Схема электрической цепи с СП токоограничителем резистивного типа

Последовательность работы СП токоограничителя при КЗ иллюстрируется осциллограммой токов, показанной на рисунке 1.7 [33].

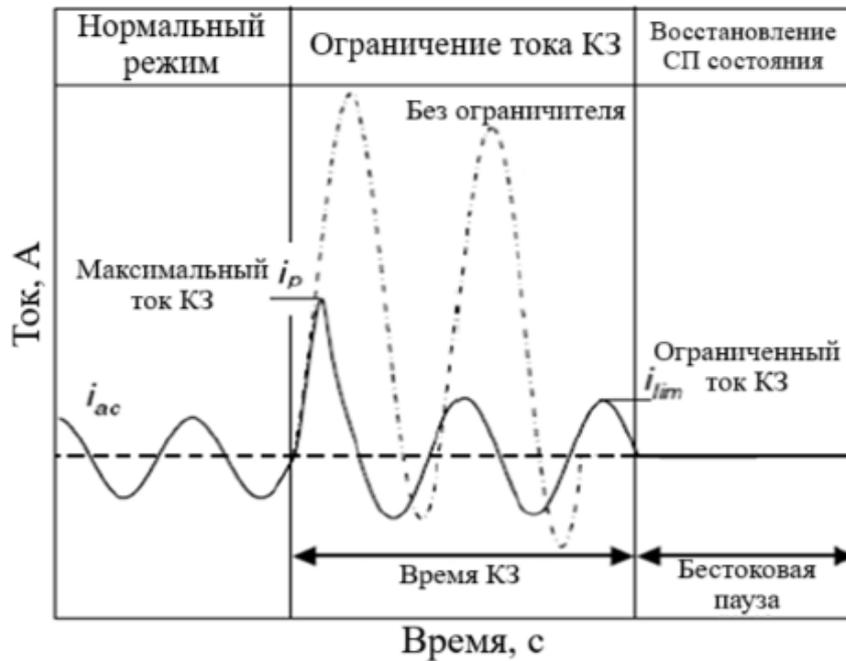


Рисунок 1.7 – Режимы токоограничителя

К достоинствам СП токоограничителей резистивного типа можно отнести надежность работы и компактность конструкции. Это наиболее простая и «прямолинейная» схема токоограничения с использованием сверхпроводимости. Недостатком является необходимость установки токовводов вне криогенной установки, которые создают дополнительные потери и теплопритоки.

1.3.2 Сверхпроводящие токоограничители индуктивного типа

Сверхпроводящие ограничители тока трансформаторного типа представляет собой трансформатор, вторичную обмотку которого, нагружают ВТСП резистором. Этот тип СОТ основан на магнитной связи между сверхпроводящим элементом и защищаемой системой [29, 31] (рисунок 1.8).

В нормальном режиме – вторичная катушка находится в сверхпроводящем состоянии. Магнитный поток, создаваемый первичной катушкой полностью скомпенсирован потоком, индуцированным в короткозамкнутой

сверхпроводящей катушке. Полное сопротивление устройства определяется только потоком рассеяния в зазоре между первичной и вторичной катушками. При КЗ вторичная катушка или ее часть переходит в нормальное состояние, поскольку ток в ней превысит критическое значение. Если сопротивление сверхпроводящей катушки станет много больше, чем индуктивное сопротивление первичной обмотки, то индуцированный ток во вторичной катушке резко упадет и магнитный поток в первичной катушке больше не будет скомпенсирован. Таким образом, индуктивное сопротивление СОР возрастет и ограничит ток КЗ [29, 33].



Рисунок 1.8 – Схема конструкции индуктивного сверхпроводящего токоограничителя

Конструкция сверхпроводящих токоограничителей трансформаторного типа отличается большей сложностью, что приводит к увеличению массогабаритных показателей и росту стоимости в сопоставлении с СОР резистивного типа.

Выпрямительный сверхпроводящий токоограничитель. В конструкции выпрямительного СП токоограничителя используется схема мостового выпрямителя, в плечах которого могут быть включены как диодные, так и тиристорные вентили, а в диагонали моста включается сверхпроводящая катушка индуктивности и источник постоянного напряжения. Катушка

индуктивности, в принципе, может быть не сверхпроводящей, но это ведет к увеличению размеров катушки и более высоким потерям из-за непрерывного протекания тока. Если использовать тиристоры вместо диодов, можно отключить ток в пределах полупериода [29].

Достоинством данного типа СП токоограничителей является то, что сверхпроводящая катушка индуктивности не переходит в нормальный режим, и поэтому время восстановления СП токоограничителя равно нулю. Кроме того, ток реагирования регулируется постоянным током и может легко быть подобран под изменяющиеся требования в энергосистеме. Недостатком применения выпрямительного СОР является то, что он снижает надежность снабжения потребителей электроэнергии, поскольку при отказе одного из вентилях электроснабжение прекращается. Кроме того, относительно высоки потери в устройстве, а также стоимость и габариты вентилях, которые должны быть рассчитаны на полную мощность электропередачи.

Сверхпроводящий токоограничитель со сверхпроводящим экраном (индуктивный сверхпроводящий токоограничитель) состоит из обычной первичной обмотки вокруг сердечника и сверхпроводящего цилиндра между обмоткой и сердечником (рисунок 1.9) [29, 33]. Принцип работы установки подобен трансформатору. Пока наведенный ток в сверхпроводящей трубе ниже критического тока, труба служит совершенным магнитным экраном для первичной обмотки. Магнитный поток в сердечнике незначителен, и сопротивление устройства, состоящее только из сопротивления первичной обмотки и индуктивности рассеяния между первичной обмоткой и сверхпроводящим цилиндром, мало. При КЗ ток в сверхпроводящем цилиндре превышает критический ток, и сопротивление трубы начинает расти. Магнитный поток в сердечнике увеличивается. Ограничивающее сопротивление формируется параллельно соединенными индуктивностью намагничивания и сопротивлением сверхпроводящего цилиндра.

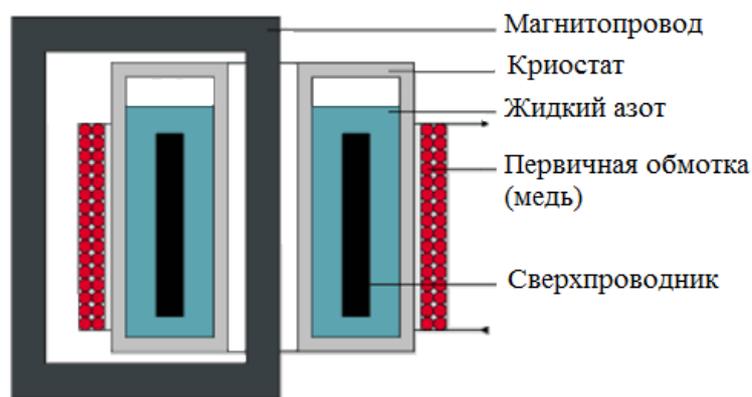


Рисунок 1.9 – Конструкция СТО со сверхпроводящим экраном

В настоящее время сверхпроводящие токоограничители активно внедряются в электрические сети по всему миру [6, 34, 35]. Наиболее популярным типом СТО-а является «резистивный» из-за оптимального соотношения простоты его конструкции и универсальности применения в сетях как переменного, так и постоянного тока.

В Российской Федерации компанией «СуперОкс» разработан сверхпроводящий токоограничитель «резистивного» типа класса напряжения 220 кВ. Токоограничитель установлен на подстанции «Мневники» 220/20 кВ в г. Москва и введен в эксплуатацию в 2019 году (рисунок 1.10). Конструкция данного СТО включает в себя три отдельных герметичных криостата наружной установки, в которых расположены фазы устройства и системы охлаждения, расположенной в отдельном помещении. Из рисунка 1.11 видно, что площадь, занимаемая тремя 40-омными фазами СТО, аналогична площади, занимаемой тремя 3,0-омными токоограничивающими реакторами с воздушным сердечником (рисунок 1.11) [36, 37].

Лабораторные испытания и непрерывная работа токоограничителя без сомнения подтверждают высокую эффективность и надежность данного типа сверхпроводящих токоограничителей. Кроме того, за период эксплуатации с 2019 года данный аппарат несколько раз ограничил ток в момент короткого замыкания в сети [36].



Рисунок 1.10 – Сверхпроводящий ограничитель тока КЗ на подстанции «Мневники» Мосэнерго 220/20 кВ (вид спереди)



Рисунок 1.11 – Сверхпроводящий ограничитель тока КЗ на подстанции «Мневники» Мосэнерго 220/20 кВ (вид сверху)

1.4 Актуальное состояние разработок в области высокотемпературных сверхпроводящих силовых трансформаторов

1.4.1 Токоограничивающая функция высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора

Рассмотренные выше варианты исполнения СП токоограничителей используют два основных свойства сверхпроводимости:

- способность находится в двух состояниях – с нулевым и конечным сопротивлением;
- способность полностью экранировать магнитный поток, будучи в сверхпроводящем состоянии.

Ни один из описанных выше типов токоограничителей в настоящее время не считается единственно правильным для массового применения. Это объясняется большими габаритами, сложностью установки системы охлаждения и высокой стоимостью сверхпроводящих устройств. Поскольку токоограничивающий эффект возникает при превышении величины одного из критических параметров ВТСП ленты (в нашем случае критического тока), то логично использовать это физическое явление при создании широко известного электротехнического оборудования: электрических машин, кабелей, трансформаторов [38]. Наиболее подходящими кандидатами для внедрения токоограничивающей функции представляются трансформаторы, в связи с их сильной уязвимостью при электродинамических и температурных воздействиях сверхтоков [39].

Функция ограничения тока КЗ ВТСП трансформатора является одним из наиболее важных преимуществ замены классических медных обмоток на сверхпроводящие. Она обеспечивает защиту и значительное снижение отказов выключателей и другого станционного оборудования, а также способствует снижению затрат на техническое обслуживание компонентов электроэнергетической системы. Использование токоограничивающей функции непосредственно в трансформаторе устраняет необходимость увеличения номиналов существующих автоматических выключателей, поскольку потенциальные токи КЗ в электрической сети возрастают из-за развития электросетевого комплекса и увеличения количества потребителей электрической энергии.

При возникновении КЗ трансформаторное оборудование особенно сильно подвержено электродинамическим силам, вызванным ударным током КЗ (рисунок 1.12) [40]. Воздействие этих сил на обмотки трансформатора способно вызвать необратимые механические повреждения (рисунок 1.13) [41]. При этом токоограничивающая функция ВТСП трансформатора способна снизить значение ударного тока КЗ и, как следствие, вероятность повреждения обмоток трансформатора. Кроме того, тепловое воздействие от длительного протекания

установившегося тока КЗ, может привести к перегреву ВТСП обмоток, нарушению их сверхпроводящего состояния и разрушению изоляции. На сегодняшний день существуют способы защиты от термического перегрева обмоток, однако с помощью традиционных токоограничителей тока невозможно ограничить ударный ток КЗ [38].

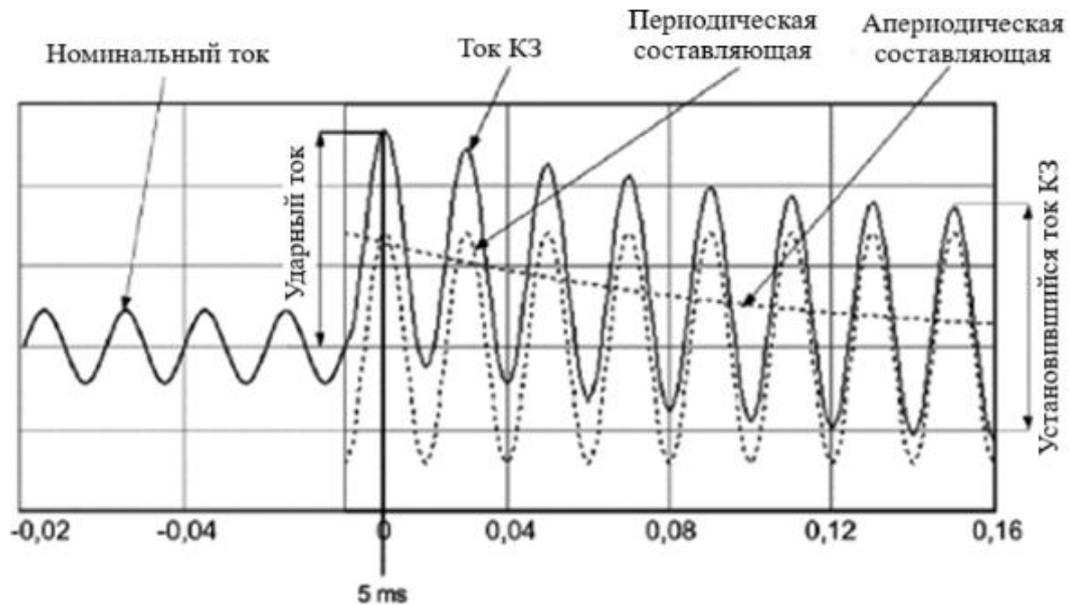


Рисунок 1.12 – Ток КЗ в обмотке трансформатора



Рисунок 1.13 – Динамические воздействия от тока КЗ

Ограничение тока КЗ с помощью ВТСП лент с высокими критическими параметрами оказывает существенное влияние на электромагнитные переходные

процессы. При превышении одного из критических параметров сверхпроводника происходит переход в резистивное состояние, сопровождающийся скачкообразным повышением активного сопротивления ВТСП провода. Появившееся сопротивление ограничивает ток КЗ, а после устранения аварии происходит возврат сверхпроводящего состояния и нормального рабочего состояния ВТСП трансформатора [39, 42]. Рассмотренные в разделе 1.2 виды ВТСП лент идеально подходят в качестве материала для токоограничивающих обмоток ВТСП трансформатора.

СП трансформатор оптимальной конструкции позволит ограничивать ударный ток КЗ в течение половины периода. Уникальная токоограничивающая функция способна обеспечить защиту трансформатора и всего смежного электросетевого оборудования от термических и динамических повреждений, возникающих в электрической сети при аварии.

1.4.2 Мировые исследования и разработки высокотемпературных сверхпроводящих трансформаторов

Перспективные электроэнергетические системы должны обладать повышенными показателями экономичности, эффективности, экологической безопасности и надежности по сравнению с действующими. Уникальный комплекс электрофизических и магнитных свойств высокотемпературных сверхпроводников обуславливает растущий научный интерес к разработке силовых ВТСП трансформаторов с криогенным охлаждением жидким азотом. Предполагается, что данная технология способна занять ключевое положение в энергетике будущего. ВТСП трансформаторы обладают существенными преимуществами перед традиционными аналогами, включая: сокращённые массогабаритные показатели, более высокую номинальную мощность и пропускную способность, повышенную устойчивость к перегрузкам без деградации ресурса вследствие теплового старения, сниженный уровень суммарных потерь, а также минимизацию рисков возгорания и экологического ущерба [38]. Однако, самым важным преимуществом, делающим ВТСП

трансформатор совершенно уникальным устройством, является возможность токоограничения. Свойство ограничивать токи перегрузки и КЗ за счёт резкого выхода сверхпроводника из СП состояния (при превышении протекающего через обмотки тока выше критического) и, как следствие, повышения резистивного сопротивления обмотки позволяет оказать положительный экономический эффект от установки трансформатора, который заключается не только в возможности установки смежных выключателей с меньшими отключающими токами, но и продлении срока эксплуатации всего смежного оборудования электрических станций и подстанций за счёт уменьшения негативного воздействия от КЗ в сети [42].

К настоящему времени крупные энергетические компании и научно-исследовательские институты реализовали многие типы программ разработки ВТСП-трансформаторов [39-46], и ожидается, что эти трансформаторы станут одним из сверхпроводящего силового оборудования, установленного в электроэнергетической системе на первом этапе коммерциализации. Однако обзор отчетов и статей, опубликованных в этой области, показывает, что предстоит еще много работы по улучшению конструкции и характеристик этих трансформаторов [47-49]. В целом основное внимание в исследованиях, проведенных в последние десятилетия, было сосредоточено на снижении потерь на переменном токе в ВТСП обмотках с целью уменьшения размеров и повышения эффективности. В работах [38–49] проведён систематический анализ ключевых аспектов применения сверхпроводников в трансформаторостроении, включая их потенциальные преимущества и проблему снижения потерь электрической энергии, требующую дальнейшего решения. Особое внимание уделяется влиянию пусковых токов и токов короткого замыкания на обмотки трансформатора и смежные участки энергосистемы. Вследствие этого, учитывая способность сверхпроводящих обмоток выполнять функцию ограничения токов КЗ за счёт перехода в резистивное состояние, значительный объём исследований сфокусирован на разработке ВТСП трансформаторов, способных ограничивать ток короткого замыкания [30, 50].

В мире активно ведутся исследования по поиску оптимальной конструкции ВТСП трансформаторов. В таблице 1.3 приведены новейшие реализованные проекты трансформаторов с ВТСП обмотками [46, 50].

Таблица 1.3 – Существующие проекты ВТСП трансформаторов

| № | Страна | Производство (компания/институт) | Год | Назначение/статус | Номинальная мощность, кВА | Количество фаз | Напряжения ВН/НН, кВ |
|----|----------------|---|------|--|---------------------------|----------------|----------------------|
| 1 | Китай | IEE CAS | 2005 | Демонстрационный/ Проработал в сети до 2012 г. | 630 | 3 | 10,5/0,4 |
| 2 | Австралия | Callaghan Innovation | 2013 | Демонстрационный | 1000 | 3 | 11/0,415 |
| 3 | Япония | Kuysu University | 2014 | Демонстрационный | 2000 | 3 | 66/6.9 |
| 4 | Китай | IEE CAS | 2014 | Демонстрационный/В сети | 1250 | 3 | 10,5/0,4 |
| 5 | Германия | KIT/ABB | 2015 | Демонстрационный | 577 | 1 | 20/1 |
| 6 | Россия | ЭНИН/ ВНИИКП/ МЕЛДИС | 2016 | Демонстрационный | 1000 | 3 | 10/0.4 |
| 7 | Китай | Shanghai Jiao Tong University | 2017 | Демонстрационный | 330 | 1 | 10/0,23 |
| 8 | Польша | Institute of Electrical Engineering and Electrotechnologies Lublin University of Technology | 2017 | Демонстрационный | 13,8 | 1 | 0,23/0,06 |
| 9 | Новая Зеландия | Robinson Research Institute, Victoria University of Wellington | 2018 | Демонстрационный | 45 | 1 | 450/450 |
| 10 | Китай | Tianjin University | 2020 | Демонстрационный | 5 | 1 | 230/110 |

Анализ вариантов исполнения ВТСП трансформаторов показывает значительную вариативность конструкций по сравнению с моделями традиционных силовых машин. Опробованы различные конструктивные варианты магнитных систем. Наиболее распространенные из них: воздушный магнитопровод, частично-воздушный, тороидальный и др. [38, 48]. Магнитная

система ВТСП трансформатора выполняется как в «теплом» исполнении (магнитопровод термически изолирован от криогенной жидкости), так и «холодном» исполнении (магнитопровод имеет непосредственный контакт с криогенной жидкостью). При «холодном» исполнении криостат имеет упрощенную конструкцию и сами размеры магнитопровода уменьшаются. Но одновременно это создает дополнительные теплопритоки, что в свою очередь увеличивает энергетические затраты, связанные с криогенным охлаждением. Выделение тепла, обусловленного токами перегрузки и холостого хода, можно существенно снизить, если изготовить магнитную систему трансформатора из аморфной стали или электротехнической стали с высокими магнитными параметрами. При «теплой» конструкции исполнения магнитной системы трансформатора значительно усложняется устройство системы охлаждения обмоток. Это негативно сказывается на масса-габаритных показателях всего трансформатора, но наряду с этим, приводит к снижению тепловых потерь в криогенной системе. В целом на конструктивное исполнение магнитной системы ВТСП трансформатора влияет лишь материал магнитопровода и его расположение относительно системы охлаждения [51] (рисунок 1.14).

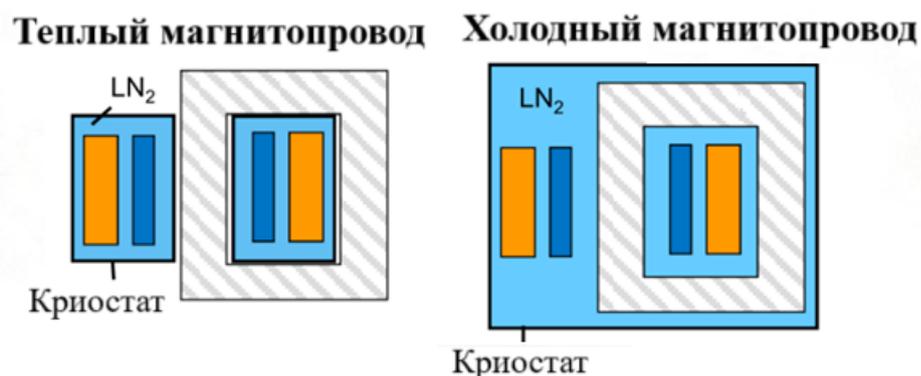


Рисунок 1.14 - Типы конструкции магнитной системы ВТСП-трансформатора

Известно множество видов исполнения ВТСП обмоток. Наиболее часто используемые варианты: однослойная или многослойная цилиндрическая, двойная дисковая (галетная) обмотки. У каждого типа есть свои достоинства и

недостатки. Двойная дисковая обмотка имеет преимущество, заключающиеся в легкой балансировке реактивного сопротивления обмотки, по сравнению с цилиндрическими обмотками. Кроме того, этот тип конструкции подходит для применения в высоковольтных трансформаторах большой мощности. К недостаткам относятся: высокая перпендикулярная составляющая тока утечки, который снижает критический ток сверхпроводника; высокие потери на переменном токе; необходимость спайки отдельных дисков обмотки, что негативно влияет на токоограничивающие свойства сверхпроводника и создает дополнительные потери [47]. Цилиндрическая конструкция обмотки лучше подходит для трансформаторов мощностью менее 1 МВА. К преимуществам данного типа можно отнести: невысокие потери энергии на переменном токе; уменьшение девиации магнитного поля рассеяния, что повышает характеристики ВСП лент [47,50]. Однако до сих пор не предложена оптимальная конструкция обмоток ВСП трансформатора, которая позволила бы решить проблему потерь в сверхпроводящих обмотках на переменном токе, а также решить вопрос оптимизации обмоток по тепловой устойчивости.

Для исследования возможности ограничивать токи КЗ с помощью ВСП трансформатора авторами статьи [52] разработан и построен ВСП трансформатор мощностью 2 МВА (рисунок 1.15). Целью данного проекта была разработка ВСП трансформатора с функцией ограничения тока КЗ для распределительной сети. В продолжение проекта в [53] был концептуально спроектирован и проанализирован трехфазный ВСП трансформатор мощностью 20 МВА, работающий сопряженно со сверхпроводящими кабелями для более эффективного ограничения тока КЗ. После испытания на внезапное короткое замыкание, чтобы быстро привести трансформатор в резистивное состояние, обмотки, состоящие из REBCO ВСП лент, должны постоянно находиться в сверхпроводящем состоянии. Авторы отмечают, что поддерживать обмотки в сверхпроводящем состоянии трансформатора мощностью 20 МВА затруднительно, поскольку для этого необходимо последовательно соединить сверхпроводящие кабели на вторичной стороне трансформатора. Исследования

демонстрируют, что совместное использование трансформатора и сверхпроводящего кабеля позволяет обеспечить ограничение тока короткого замыкания до уровня трехкратного номинального тока. Отмечается необходимость контроля условий токоограничивающего взаимодействия и корректного выбора критического тока и толщины стабилизирующего слоя сверхпроводника.

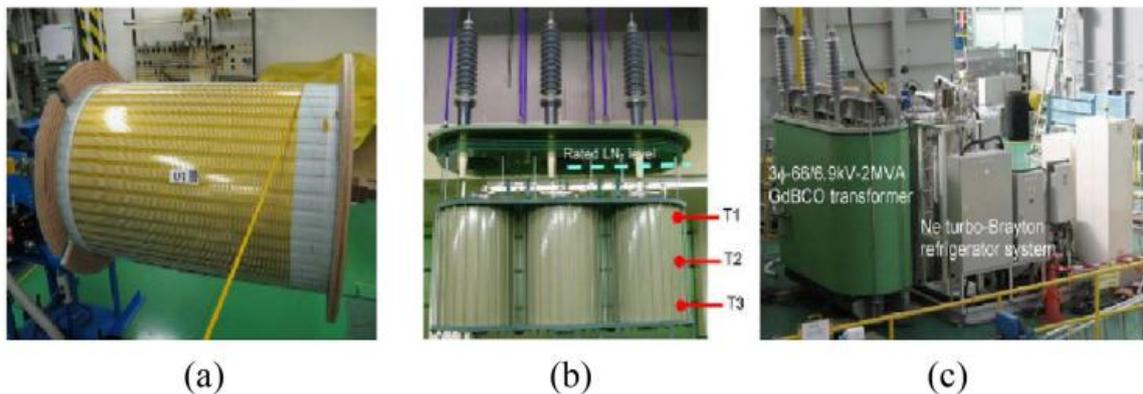


Рисунок 1.15 – Трехфазный ВТСП трансформатор мощностью 2 МВА:
а) процесс намотки; б) готовые обмотки; в) трансформаторная система

В [43] предложена конструкция прототипа ВТСП трансформатора с медной катушкой высокого напряжения и сверхпроводящей катушкой низкого напряжения. Целью данного исследования было - найти компромисс между эффективным и действенным ограничением аварийного тока в сети, меньшими потерями и уменьшением размера трансформатора. Этот трансформатор был разработан компанией «ABB» в Германии.

Как показано в [54], на основе компьютерного моделирования однофазного ВТСП трансформатора мощностью 10 кВА (рисунок 1.16), предназначенного для ограничения токов КЗ, была создана его физическая модель. Экспериментальные результаты подтвердили адекватность численной модели, которая впоследствии была адаптирована под исследования токоограничивающих характеристик промышленного трансформатора мощностью 10 МВА. Показано, что ВТСП трансформатор способен ограничивать ток КЗ. Однако, из-за небольшого поперечного сечения обычных металлических слоев и низкой теплоемкости обмоток ток КЗ должен

отключаться дополнительным устройством в течение относительно короткого времени, чтобы предотвратить катастрофический рост температуры.

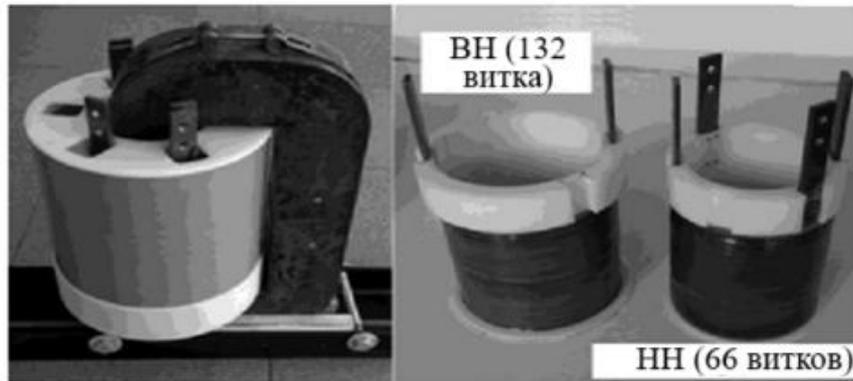


Рисунок 1.16 – Однофазный ВТСП трансформатор мощностью 10 кВА

В [55] основное внимание уделялось тестам ограничения тока. Однофазный сверхпроводящий гибридный трансформатор мощностью 1 МВА был разработан, изготовлен и оптимизирован для обеспечения высокой способности ограничения тока КЗ и низких рабочих потерь. Эта конструкция отличается более высокой эффективностью с потенциалом уменьшения размеров и эффективным ограничением тока КЗ.

В рассмотренных выше работах представлены результаты исследования токоограничивающей функции ВТСП трансформаторов. Созданные математические модели с достаточной степенью точности описывают электромагнитные переходные процессы в ВТСП трансформаторе в момент токоограничения. Однако, существующие модели исследования электромагнитных переходных процессов не учитывают влияния магнитного поля сердечника трансформатора на величину критического тока сверхпроводника, что является важнейшим параметром при исследовании процесса ограничения тока КЗ. Недостаточно исследованы тепловые процессы в обмотках трансформатора, что имеет важнейшее значение для работы трансформатора в режиме токоограничения (беспрепятственный возврат сверхпроводника в сверхпроводящее состояние, например за цикл АПВ). До сих пор не была предложена адекватная методика расчета основных электрических

параметров ВТСП трансформатора с учетом требований к величине плотности тока (200-400 А/мм²), напряжению короткого замыкания (0,5-1,5%), магнитной индукции стержня, природе потерь в сверхпроводящих обмотках, токоограничивающей функции, а также критическим параметрам сверхпроводника. Также требуется создание математических моделей и определение методов исследования влияния ВТСП трансформаторов на компоненты и оборудования электроэнергетических систем, а исследований по анализу влияния на статическую и динамическую устойчивости не проводилось вообще.

В связи с изложенным, использование трансформатора с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками представляется актуальным и предполагает разработку и создание математических моделей и физических прототипов ВТСП трансформаторов для изучения электромагнитных, электромеханических и тепловых процессов с целью совершенствования токоограничивающей функции, а также повышения энергоэффективности, надежности и устойчивости электроэнергетических систем.

Выводы по главе 1

1. Проблема ограничения токов короткого замыкания возникает в электрических сетях классов напряжений 10 - 220 кВ при увеличении нагрузок потребителей, мощности генерирующих объектов и развитии электросетевого комплекса. В этой связи, исследование и разработка новых токоограничивающих устройств и методов, в частности ВТСП трансформаторов с токоограничивающей функцией, является весьма востребованной и актуальной задачей.

2. Развитие промышленного производства ВТСП лент второго поколения с высокими критическими параметрами сверхпроводника с их применением в ВТСП трансформаторах, необходимость повышения их технической и

экономической эффективности, способствуют поиску оптимальных конструкций ВТСП трансформаторов с дополнительными функциями, в частности, ограничения токов КЗ, что положительно влияет на динамическую устойчивость параллельной работы генераторов в электрических сетях.

3. Проведенный анализ образцов ВТСП лент показал, что наиболее перспективным вариантом использования в качестве материалов ВТСП обмоток трансформатора являются отечественные сверхпроводящие ленты производства компании «СуперОкс».

4. Обзор проведенных мировых и отечественных исследований показал, что наиболее важными задачами на сегодняшний день являются:

- разработка методологии определения оптимальных функций, параметров и конструкций ВТСП трансформаторов с учетом особенностей природы сверхпроводника для достижения наилучших технических характеристик данного устройства и их применения в электрических сетях;

- разработка математических и физических моделей ВТСП трансформаторов с целью проведения достоверного анализа электромагнитных, электромеханических и тепловых процессов в электрической сети, сопряженной с использованием ВТСП трансформаторов.

2 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ

2.1 Постановка задачи

Электрические параметры силовых трансформаторов играют большую роль в расчете и исследовании режимов электрических сетей. Они оказывают существенное влияние на потери активной и реактивной мощности, на отклонение напряжения при трансформации, а также на переходные процессы, возникающие при КЗ. На сегодняшний день научным сообществом еще не выработаны устоявшиеся модели режимов электрических сетей с ВТСП трансформаторами с функцией ограничения тока.

На первом этапе для исследования переходных процессов в электрических сетях с ВТСП трансформаторами при возникновении КЗ, бросков тока при включении трансформаторов в сеть необходимо разработать математическую модель, способную с достаточной точностью моделировать взаимосвязанную динамику электромагнитных, электромеханических процессов в электрической сети, тепловых процессов с потерей и восстановлением сверхпроводимости ВТСП обмоток. При этом необходимо учитывать 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.

Математическая модель должна быть верифицирована физическими экспериментами. Для этого необходимо разработать прототип ВТСП трансформатора с функцией ограничения тока КЗ и провести его

экспериментальные исследования в режимах КЗ, включения трансформатора в сеть, а полученные результаты сравнить с результатами численного моделирования, и, при необходимости, провести соответствующую корректировку модели в части учета значимых факторов и настройку ее параметров.

На втором этапе с учетом возможностей исследования процессов, как на физической, так и математической модели необходимо обосновать рекомендации по разработке ВТСП трансформаторов с функцией ограничения тока КЗ для их безопасной и эффективной эксплуатации.

2.2 Основные положения теории сверхпроводимости, применяемые к задаче исследования

Классическая теория сверхпроводимости с достаточной точностью описывает два основных свойства сверхпроводников: эффект Мейснера и наличие практически нулевого электрического сопротивления [7]. Эффект Мейснера получил широкое применение в сильных магнитах медицинского и научного назначения, рабочие режимы которых обусловлены протеканием постоянного тока. При протекании же переменного тока в сверхпроводнике существуют определенные потери, вызванные постоянным изменением напряженности электромагнитного поля. Данные потери по сравнению с потерями в обычных медных проводниках являются весьма малыми, однако их наличие существенно ослабляет проявление диамагнетизма сверхпроводника. В связи с этим, при проектировании и исследовании крупногабаритных ВТСП устройств, работающих на переменном токе промышленной частоты (50 Гц), можно пренебречь эффектом Мейснера [7].

Поскольку все высокотемпературные сверхпроводники относятся к сверхпроводникам второго рода, то с точки зрения теории электрических цепей, ВТСП провод можно рассматривать как элемент с нелинейным сопротивлением, зависящим от переменного тока, протекающего по нему. Обычно для

представления нелинейного сопротивления ВТСП проводов используют вольт-амперную характеристику (ВАХ) для сверхпроводников второго рода (рисунок 2.1) [8].

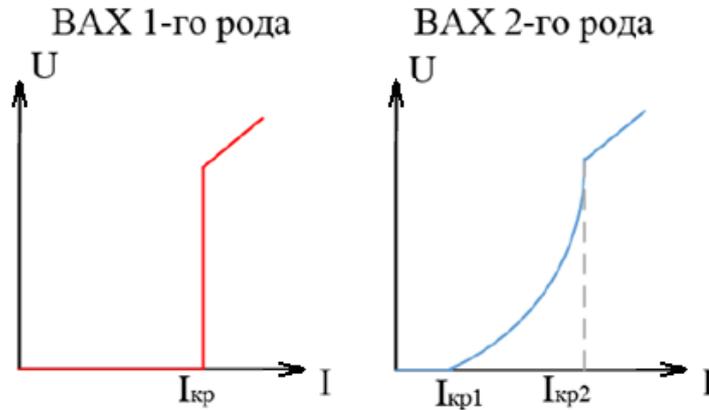


Рисунок 2.1 – Вольт-амперные характеристики сверхпроводников

При построении ВАХ используют два критических тока, поскольку при потере сверхпроводимости в высокотемпературных сверхпроводниках наблюдается смешанное состояние в интервале от $I_{кр1}$ до $I_{кр2}$. ВАХ нелинейного сопротивления можно с достаточной точностью описать с помощью степенной функции:

$$E = E_0 \cdot \left(\frac{I}{I_{кр1}} \right)^n, \quad (2.1)$$

где E_0 – напряженность поля на сверхпроводнике при протекании по нему критического тока, мкВ/см; I – протекающий по сверхпроводнику ток, А; $I_{кр1}$ – первый критический ток сверхпроводника, обычно за его значение принимают такой ток, при котором напряженность электрического поля в сверхпроводнике будет равна 1 мкВ/см; n – показатель «крутизны» ВАХ.

При исследовании электрических машин и аппаратов на основе явления высокотемпературной сверхпроводимости понятие второго критического тока не используется. Это объясняется представлением ВТСП в качестве электрического сопротивления, которое зависит от транспортного тока [56], воздействующего магнитного поля и температуры. Также, при исследовании

потери сверхпроводимости (например, в момент ограничения тока КЗ), следует особое внимание уделять тепловым процессам в сверхпроводнике.

Кроме того, дополнительные трудности при исследовании ВТСП устройств создает неравномерность распределения первого критического тока (далее просто «критический ток») по всей длине сверхпроводника. Это говорит о том, что показатель «крутизны» ВАХ в разных частях ВТСП провода может отличаться [57].

2.3 Экспериментальный прототип силового однофазного высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора

Одними из наиболее перспективных устройств по соотношению перечисленных в предыдущих разделах преимуществ, сложности изготовления и эксплуатации являются силовые ВТСП трансформаторы с функцией токоограничения. Для проведения адекватного исследования процесса ограничения тока, тепловых, электромагнитных и электромеханических переходных процессов в электрической сети с ВТСП трансформатором необходимо создать математические и имитационные модели, с достаточной точностью описывающие эти процессы, которые следует верифицировать при помощи физических экспериментов с прототипом ВТСП трансформатора.

На кафедре «Системы электроснабжения предприятий» Новосибирского Государственного Технического Университета разработан прототип силового однофазного ВТСП трансформатора с функцией токоограничения с учетом критических параметров ВТСП лент, особенностей потерь в сверхпроводниках на переменном токе, условий потери сверхпроводимости при токоограничении и ее последующем возврате. Конструкция разработанного прототипа приведена ниже.

2.3.1 Обмотки

Как было показано в главе 1, конструкций ВТСП обмоток не отличаются от конструкции обмоток обычных трансформаторов. Принципиальное значение имеет выбор сверхпроводящего материала.

В настоящее время в мире происходит увеличение производства сверхпроводников второго поколения. Хотя ВТСП провод второго поколения доступен еще в недостаточном количестве (в основном из-за того, что этот продукт не находится в публичном доступе) для реального будущего рынка ВТСП устройств, некоторые эксперты сходятся во мнении, что сегодняшние поставки превышают потребности [58, 59].

Чтобы преуспеть и поддержать медленно, но неуклонно развивающийся рынок сверхпроводников, производители проводов должны поддерживать стабильное качество и воспроизводимость сверхпроводящих свойств своего провода и предлагать материалы, подходящие для различных применений в области электроэнергетики.

По критерию наилучших технических характеристик и критических параметров сверхпроводника (глава 1) для конструирования образца однофазного ВТСП трансформатора была выбрана сверхпроводящая лента отечественного производства компании «СуперОкс» [25]. Было закуплено 45 метров высокотемпературной сверхпроводящей ленты, изготовленной из сверхпроводников второго поколения YBCO (рисунок 2.2), параметры которой приведены в таблице 2.1.



Рисунок 2.2 – Сверхпроводящая YBCO лента производства «СуперОкс»

Таблица 2.1 - Основные характеристики ВТСП ленты

| | |
|-------------------------------------|-----|
| Ширина, мм | 4 |
| Критический ток (77 К), А | 80 |
| Критический диаметр изгиба, мм | 22 |
| Предел прочности на растяжение, МПа | 500 |

На основе эпоксидного компаунда изготовлены два теплоизолированных каркаса для намотки обмоток из сверхпроводящей ленты.

ВТСП лента второго поколения использована для разработки физической модели сверхпроводящего трансформатора мощностью 9 кВА, с соотношением напряжений первичной и вторичной обмотки 220/110 В. Обмотки высокого и низкого напряжения представлены на рисунке 2.3.

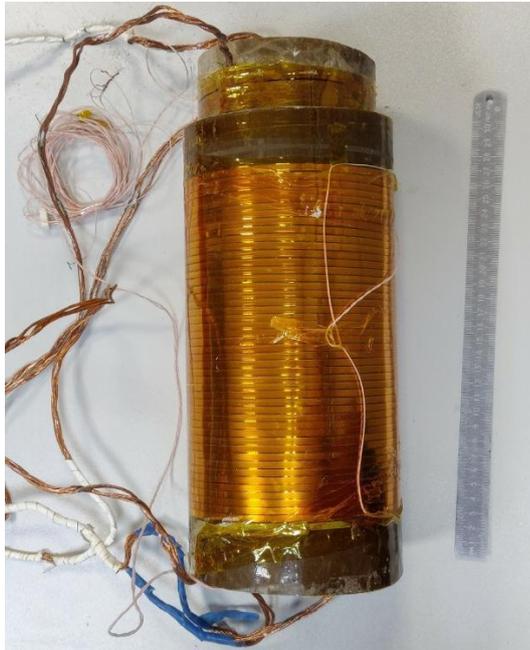


Рисунок 2.3 – Обмотки ВН и НН одна в другой с припаянными токовыми и измерительными проводами

2.3.2 Магнитопровод

В главе 1 показано, что магнитопроводы ВТСП и классических трансформаторов конструктивно схожи. Принципиальное конструктивное отличие заключается в необходимости применения криостата – герметичной емкости, предназначенной для хранения хладагента (жидкого азота), обеспечивающего непосредственный тепловой контакт с ВТСП лентой.

Выделяют две базовые конфигурации расположения криостата относительно магнитной системы, а именно: исполнение с «холодным» магнитопроводом и с «тёплым» магнитопроводом (рисунок 1.14).

В конфигурации с «холодным» магнитопроводом последний погружен в хладагент, а криостат полностью герметизирует трансформатор. К преимуществам данной схемы относятся: упрощенная конструкция криостата и снижение магнитного потока рассеяния. Основным недостатком является повышенный уровень тепловых потерь, обусловленный необходимостью охлаждения магнитопровода, нагреваемого вследствие потерь холостого хода.

В конфигурации с «тёплым» магнитопроводом в криогенную среду погружены исключительно обмотки, в то время как магнитная система изолирована от прямого контакта с хладагентом. Рабочая температура магнитопровода в данном исполнении соответствует комнатной. Перечень преимуществ и недостатков данной конструкции противоположен «холодному» исполнению магнитопровода.

Анализ существующих технических решений свидетельствует о том, что фактор энергозатрат на охлаждение магнитопровода является более критичным. Вследствие этого, оптимальной и наиболее распространенной в современной практике признана конструкция ВТСП трансформатора с «тёплым» магнитопроводом [50, 51].

Магнитопровод опытного образца ВТСП трансформатора выполнен шихтованным, в броневом исполнении. В качестве материала пластин использовалась холоднокатаная электротехническая сталь марки 3408 толщиной листа 0,3 мм. Межлистовая изоляция обеспечивалась технической бумагой, импрегнированной электроизоляционным составом. Для стяжки ярм и одного из стержней применялся стальной уголок, зафиксированный болтовыми соединениями; второй стержень был стянут бандажом из полимерной ленты.

Характеристика криосреды: магнитная система сконструирована в «теплом» исполнении. Процесс сборки магнитопровода показан на рисунках 2.4 – 2.5.



Рисунок 2.4 – Процесс сборки магнитопровода

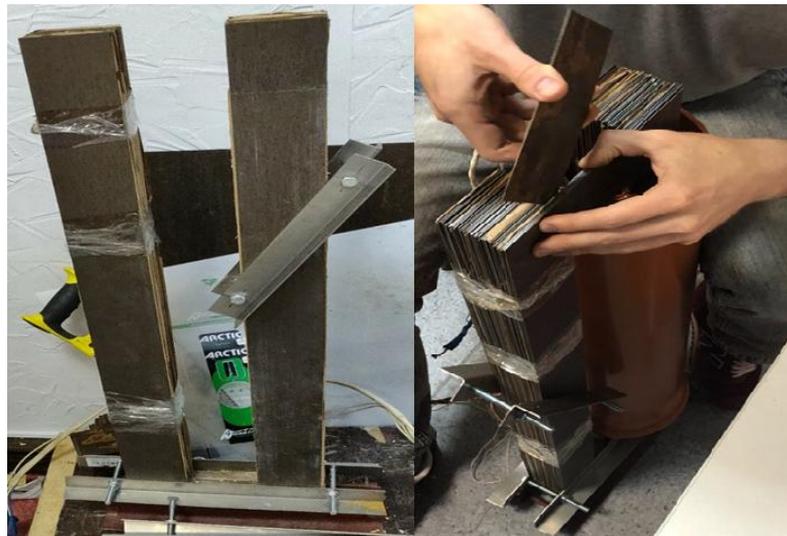


Рисунок 2.5 – Процесс сборки магнитопровода

2.3.3 Криостат

Для ВТСП трансформаторов с магнитной системой «теплого» исполнения криостат должен быть изготовлен из немагнитного непроводящего материала, для предотвращения наведения нежелательных магнитных полей и создания замыканий. Также слой теплоизоляции никак не должен влиять на магнитную связь обмоток и магнитопровода, тем самым создавая дополнительные потери [50].

Криостат ВТСП трансформатора должен обладать необходимым запасом механической прочности, чтобы удерживать в себе большие объемы криогенной жидкости. Самой важной задачей криостата является минимизация теплового обмена криогенной жидкости с окружающей средой. Высокое качество

теплоизоляционного материала позволяет снизить затрачиваемую мощность на охлаждение обмоток и повысить КПД системы охлаждения.

Криостат однофазного экспериментального трансформатора собран из полипропилена с теплоизоляцией из экструдированного пенополистирола (ЭППС). Впоследствии конструкция криостата была усовершенствована. В качестве ёмкости были использованы полипропиленовые трубы диаметрами 160 мм и 110 мм с заглушкой с нижней стороны (рисунок 2.6). Полипропилен обладает очень низкой степенью усадки при охлаждении до -200°C , не трескается, но имеет низкие теплоизоляционные свойства. Для дополнительной теплоизоляции использованы пеноплексовые плоские и цилиндрические элементы (рисунок 2.7).



Рисунок 2.6 – Однофазный образец ВТСП трансформатора с полипропиленовым криостатом



Рисунок 2.7 – Однофазный образец ВТСП трансформатора с полипропиленовым криостатом в теплоизоляционной оболочке из пеноплекса

2.3.4 Параметры физической модели однофазного высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора

Сконструированный прототип силового однофазного ВТСП трансформатора мощностью 2,5 кВА предназначен для глубокого экспериментального исследования тепловых и электромагнитных переходных процессов в электрической сети в момент ограничения тока КЗ и верификации его математической модели для исследований ограничения тока КЗ в сетях более сложной структуры и конфигурации.

Прототип ВТСП трансформатора (рисунок 2.8) состоит из двух обмоток – высокого (ВН) и низкого (НН) напряжения с соотношением напряжений 100/50 В, стального шихтованного магнитопровода броневого типа, выполненного в «теплом» исполнении, полипропиленового криостата с теплоизоляцией из экструдированного пенополистирола. Параметры сконструированного ВТСП трансформатора представлены в таблице 2.2.



Рисунок 2.8 - Однофазный опытный образец ВТСП трансформатора

Таблица 2.2 - Параметры сконструированного прототипа ВТСП трансформатора

| Параметр | Первичная обмотка | Вторичная обмотка |
|--|---|-------------------|
| Материал ВТСП ленты | Y ₁ Ba ₂ Cu ₃ O ₇ | |
| Ширина ВТСП ленты, мм | 4 | |
| Критическая температура ленты, К | 93 | |
| Предел прочности ленты, МПа | 500 | |
| Критический ток ленты, А | 80 | |
| Показатель степени вольт-амперной характеристики | 25 | |
| Рабочая температура, К | 77 | |
| Длина ВТСП ленты YBCO, м | 16,5 | 8,1 |
| Напряжение, В | 100 | 50 |
| Номинальный ток, А | 25 | 50 |
| Число витков | 46 | 23 |
| Индуктивность, мкГн | 162,09 | 34,4 |
| Высота обмоток, мм | 210 | 135 |
| Диаметр обмоток, мм | 130 | 110 |
| Параметры магнитопровода | | |
| Материал | Электротехническая сталь | |
| Толщина листа, мм | 0,3 | |
| Изоляция | Бумажная изоляция | |
| Коэффициент заполнения | 0,75 | |

2.4 Математическая модель электромагнитных и тепловых переходных процессов в однофазной сети с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором

Исследование переходных процессов в сети с ВТСП трансформатором базируется на расчетах электрических, магнитных и тепловых параметров режима рассматриваемой электрической сети на основе заданных начальных условий переходного процесса.

Для моделируемой электрической сети с ВТСП трансформатором исходными данными являются параметры магнитной и электрической цепи, конструктивные, тепловые и критические параметры сверхпроводящих обмоток. В результате моделирования необходимо оценить изменения токов в сети, температуры в обмотках трансформатора, с учетом влияния критических параметров сверхпроводника на режим ограничения тока КЗ, и изменения магнитных потоков в магнитной системе трансформатора.

Математическая модель процессов в общем виде представляет собой систему дифференциальных и алгебраических уравнений, а исследования на ее основе состоит из трёх этапов [60]:

- построение модели с доказательством ее адекватности реальным процессам;
- исследование поведения объекта;
- оценка результатов исследований.

Принципиальная схема замещения ВТСП трансформатора в режиме холостого хода существенно не отличается от схемы обычного трансформатора (рисунок 2.9).

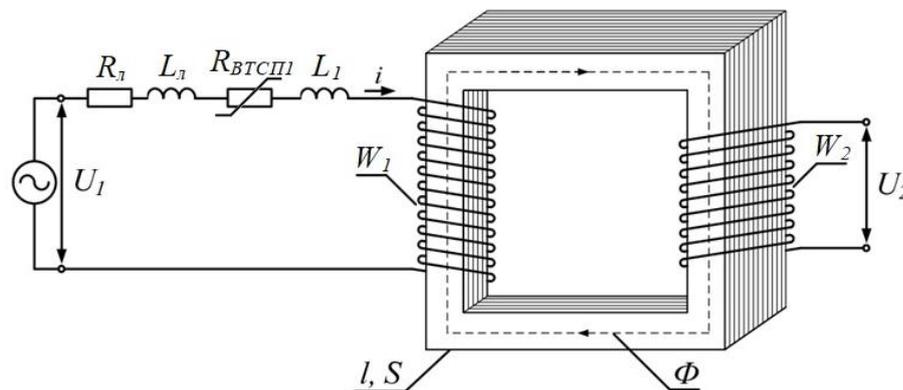


Рисунок 2.9 – Принципиальная схема однофазной сети с ВТСП трансформатором в режиме холостого хода:

U_1 – питающее сеть переменное напряжение; U_2 – переменное напряжение на разомкнутой вторичной обмотке; i – ток намагничивания; Φ – магнитный поток; R_l – активное сопротивление отходящей от ВТСП трансформатора линии; L_l – индуктивность отходящей линии; $R_{VTСП}$ – активное нелинейное сопротивление первичной обмотки ВТСП трансформатора; L_1 – индуктивность рассеяния первичной обмотки; W_1 и W_2 – число витков первичной и вторичной обмоток соответственно; l – длина средней линии магнитопровода; S – площадь поперечного сечения магнитопровода

Основным отличием является активное сопротивление обмотки $R_{\text{ВТСП}}$, значение которого имеет нелинейную зависимость от изменения протекающего по обмотке тока I , напряженности магнитного поля H и температуры обмотки T . В сверхпроводящем состоянии обмотки сопротивление $R_{\text{ВТСП}}$ равно нулю. При превышении одного из критических параметров $R_{\text{ВТСП}}$ резко возрастает, примерно за 10^{-12} с, и обмотка переходит в резистивное состояние [61].

Для анализа намагничивания сердечника трансформатора принято использовать динамическую петлю гистерезиса. Форма этой характеристики зависит от конструкции магнитной системы, параметров используемого материала и предшествующего состояния системы, что делает весьма затруднительным математическое описание процессов в трансформаторе при магнитном насыщении сердечника. Поэтому для расчета процесса перемагничивания магнитопровода (рисунок 2.10) использована упрощенная форма кривой намагничивания, поскольку максимальная погрешность от не учёта явления гистерезиса составляет существенно меньше одного процента, а при глубоком насыщении происходит сильное сужение гистерезисной петли, что позволяет её пренебречь.

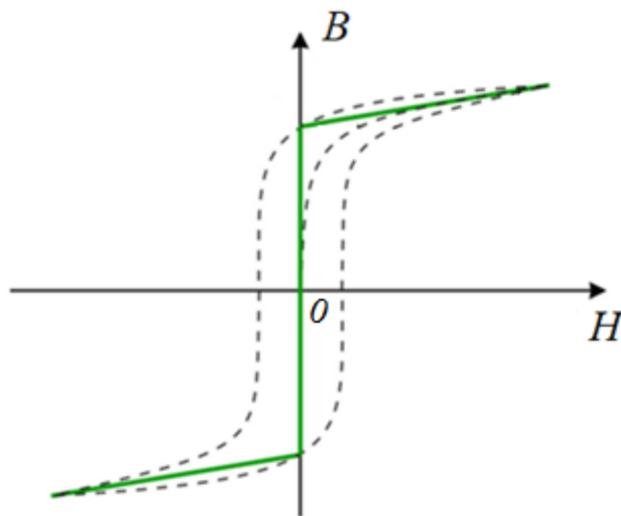


Рисунок 2.10 - Упрощенная форма кривой намагничивания

Ввиду того, что значения емкостных токов, возникающих между магнитопроводом и обмотками, достаточно малы, ими также можно пренебречь.

Используя второй закон Кирхгофа, составим дифференциальное уравнение процесса в сети, представленной на рисунке 2.9

$$U_1 = i(R_{\text{Л}} + R_{\text{ВТСП}}(i, T)) + (L_{\text{Л}} + L_1) \frac{di}{dt} + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (2.2)$$

где U_1 – питающее сеть переменное напряжение, В; i – ток намагничивания, А; Ψ – потокосцепление первичной ВТСП обмотки, Вб; $R_{\text{Л}}$ – активное сопротивление отходящей от ВТСП трансформатора линии, Ом; $L_{\text{Л}}$ – индуктивность отходящей линии, Гн; T – температура ВТСП обмотки, К; $R_{\text{ВТСП}}(i, T)$ – активное нелинейное сопротивление первичной обмотки ВТСП трансформатора, зависящее от протекающего тока и температуры обмотки, Ом; L_1 – индуктивность рассеяния первичной обмотки, Гн.

Уравнение полного тока представим в упрощенной форме

$$\oint H dl = H \cdot l_{\text{cp}} = i \cdot W_1, \quad (2.3)$$

где H – напряжённость магнитного поля, А/м; l_{cp} – длина средней линии магнитопровода, м; W_1 – число витков первичной обмотки.

Скорость изменения потокосцепления $\frac{d\Psi}{dt}$ для рассматриваемого контура составляет

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi}{di} \cdot \frac{di}{dt}, \quad (2.4)$$

где $\frac{d\Psi}{di}$ – дифференциальная индуктивность $L_{\text{Д}}$, Гн [62].

Кривую намагничивания для любого типа сердечника можно представить в виде зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля сердечника [63]

$$B = f(H). \quad (2.5)$$

Потокосцепление запишем в виде

$$\Psi = B \cdot S \cdot W_1, \quad (2.6)$$

где S – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Уравнение дифференциальной индуктивности представим в виде

$$L_{\text{Д}} = \frac{d\Psi}{di} = \frac{W_1^2 S}{l_{\text{ср}}} \cdot \frac{dB}{dH}. \quad (2.7)$$

Подставляя уравнение (2.6) в (2.1) и преобразовывая, получим

$$U_1 = i(R_{\text{Л}} + R_{\text{ВТСП}}(i, T)) + (L_{\text{Л}} + L_1) \frac{di}{dt} + L_{\text{Д}} \frac{di}{dt}. \quad (2.8)$$

Преобразуем получившееся уравнение (2.8) в форму Коши

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_1 - i(R_{\text{Л}} + R_{\text{ВТСП}}(i, T))}{L_{\text{Л}} + L_1 + L_{\text{Д}}}. \quad (2.9)$$

Принимая во внимание закон полного тока и известную для выбранного типа сердечника зависимость $B = f(H)$, решение уравнение (2.9) можно получить одним из численных методов в программно-вычислительном комплексе MATLAB/Simulink. Однако, для адекватного описания переходных процессов в сети с ВТСП трансформатором, математическая модель должна учитывать нелинейную зависимость активных сопротивлений обмоток трансформатора от протекающего тока, напряженности магнитного поля и температуры обмоток.

Критическая площадь сверхпроводящей обмотки определяется основными теоретическими параметрами сверхпроводника: критическим током I_c , критической температурой T_c и критической напряженностью магнитного поля H_c (рисунок 2.11) [64, 65]. Фактические критические параметры обмотки ($T_{\text{ср}}$, $H_{\text{ср}}$, $I_{\text{ср}}$), имеющие более низкие значения, определяют положение ее реальной критической поверхности и локализуют на ней рабочую точку $P_{\text{ср}}$. Условием сохранения сверхпроводящего состояния является нахождение эксплуатационной точки P_w с координатами T_w , H_w , I_w в области под указанной поверхностью, что обеспечивается одновременным неперевышением температурой, напряженностью магнитного поля и плотностью тока их реальных критических значений.

Ввиду высоких критических значений напряженности магнитного поля современных сверхпроводящих материалов ее влияние на переходный процесс в

моменты включения ВТСП трансформатора и ограничения тока в сети учитывать не будем. Тогда активное сопротивление ВТСП обмотки можно выразить зависимостью от протекающего в сети тока и температуры обмотки.

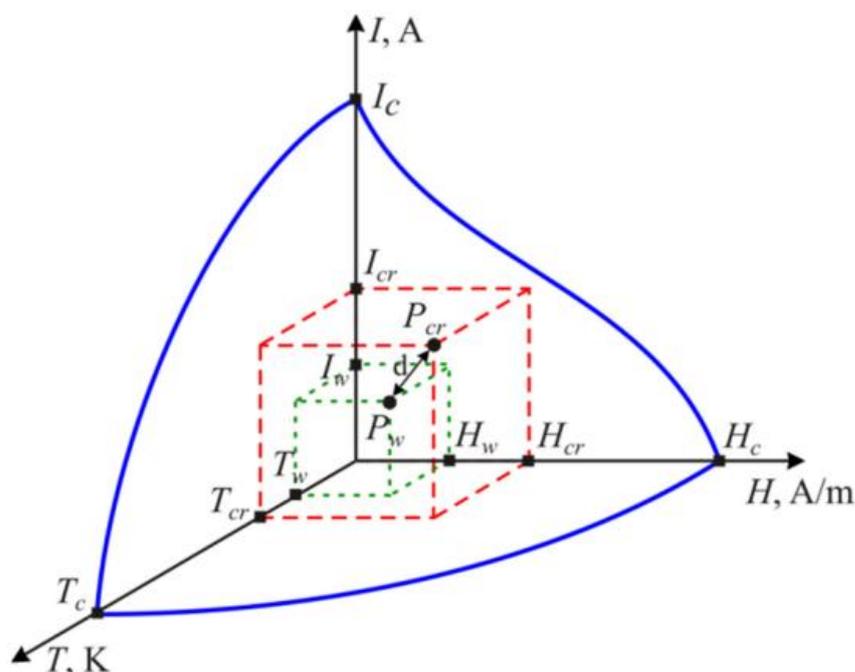


Рисунок 2.11 – Критическая область сохранения сверхпроводящего состояния для ВТСП ленты

В качестве материала для обмоток разработанного прототипа ВТСП трансформатора использовалась ВТСП лента производства российской компании «СуперОкс». Анализируя слоистую структуру ленты (глава 1, рисунок 1.4), отметим, что в нормальном режиме активное сопротивление обмотки равно нулю – ток протекает по сверхпроводящему слою ленты (рисунок 2.12, а). Однако, в момент короткого замыкания протекающий в сети ток (рисунок 2.12, а) превышает критическое значение тока ВТСП ленты, что провоцирует потерю сверхпроводящего состояния обмотки ВТСП трансформатора и вызывает резкое повышение его активного сопротивления. Появление активного сопротивления ограничивает аварийный ток КЗ. В этот момент переходного процесса ток протекает по каждому слою ВТСП ленты (рисунок 2.12, б).

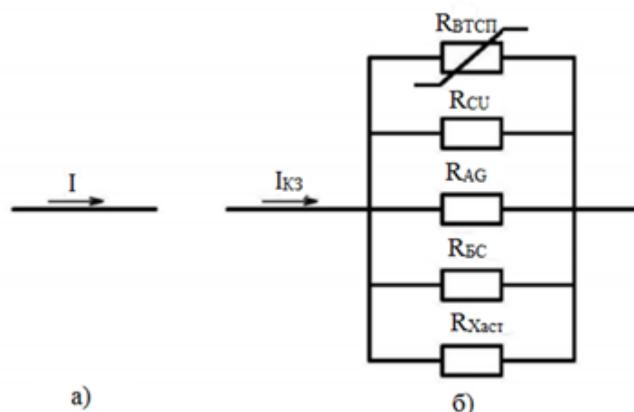


Рисунок 2.12 – Схема замещения ВТСП ленты:

а) в сверхпроводящем состоянии; б) в резистивном состоянии

$R_{ВТСП}$ – сопротивление сверхпроводящего слоя; R_{Cu} – сопротивление медного слоя, R_{Ag} – сопротивление серебряного, $R_{БС}$ – сопротивление буферного слоя, $R_{Хаст}$ – сопротивление хастеллоя

Согласно изложенному, механизм ограничения тока КЗ возможен посредством перехода обмотки из сверхпроводящего состояния в резистивное. Вследствие этого, активное сопротивление сверхпроводящего слоя ВТСП трансформатора может быть определено на основе ВАХ, примененного в исследовании сверхпроводящего материала YBCO (рисунок 2.13).

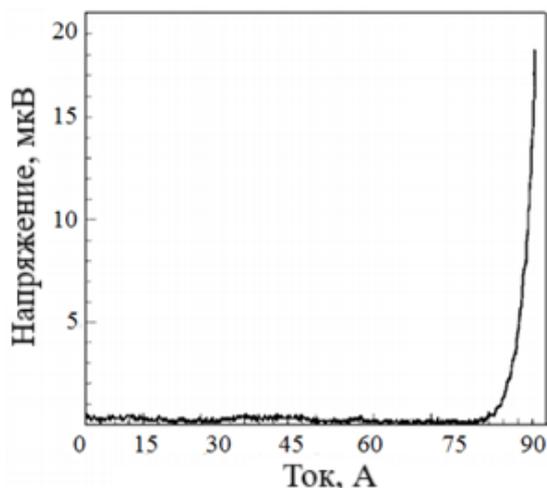


Рисунок 2.13 – Вольт-амперная характеристика используемой сверхпроводящей ленты из YBCO

Нелинейное активное сопротивление сверхпроводящего слоя ВТСП ленты, зависящее от протекающего тока и температуры обмотки, выразим

аппроксимацией ВАХ. В модели примем, что параметры ВТСП ленты одинаковы по всей длине

$$R_{YBCO}(I, T) = \frac{E_0}{I} \left(\frac{I}{I_K(T)} \right)^n \cdot l, \quad (2.10)$$

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.

В модели также учтем зависимость критического тока сверхпроводника от температуры обмотки [66, 67]

$$I_K(T) = -\frac{I_{K0}(B)}{0,1848} \ln\left(\frac{T}{93}\right), \quad (2.11)$$

где $I_{K0}(B)$ – значение критического тока ВТСП ленты в зависимости от величины воздействующего магнитного поля при температуре 77 К, А.

В трансформаторе величина воздействующего на ВТСП ленту магнитного поля зависит от зазора между магнитопроводом и обмотками. Зная геометрические параметры элементов трансформатора, по кривым представленным на рисунке 2.14 можно определить величину изменения критического тока относительно его значения в собственном поле [16].

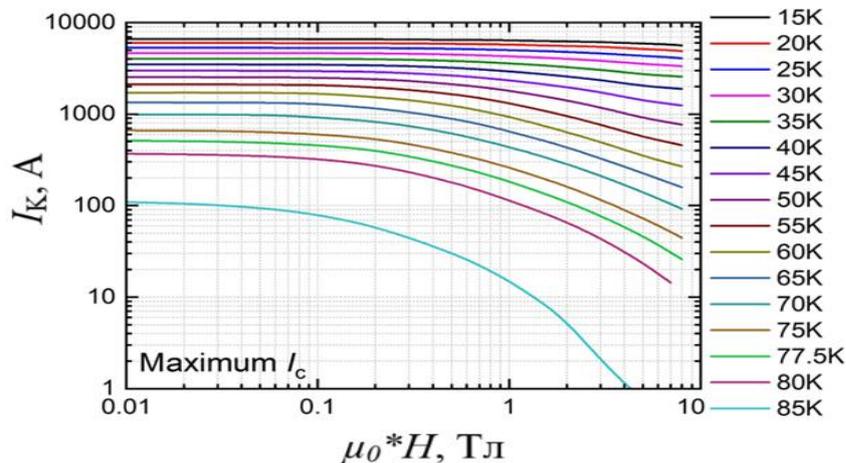


Рисунок 2.14 – Зависимость критического тока от внешнего магнитного поля для ВТСП ленты производства «СуперОкс» толщиной 4 мм

Сопротивление несверхпроводящих слоев ВТСП ленты выразим в зависимости от температуры, что позволит с большей точностью исследовать тепловой процесс при ограничении тока КЗ

$$R_{\text{НС}}(T) = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{CU}}(T)} + \frac{1}{R_{\text{AG}}(T)} + \frac{1}{R_{\text{Буф}}(T)} + \frac{1}{R_{\text{Хаст}}(T)}}, \quad (2.12)$$

где $R_{\text{CU}}(T)$ – сопротивление слоя меди в зависимости от температуры, Ом;

$R_{\text{AG}}(T)$ – сопротивление слоя серебра в зависимости от температуры, Ом;

$R_{\text{Буф}}(T)$ – сопротивление буферного слоя в зависимости от температуры, Ом;

$R_{\text{Хаст}}(T)$ – сопротивление хастеллоя в зависимости от температуры, Ом.

По схеме, представленной на рисунке 2.12, найдем эквивалентное сопротивление, позволяющее представить ВТСП обмотку в двух режимах (нормальном сверхпроводящем и режиме ограничения тока КЗ)

$$R_{\text{ВТСП}}(I, T) = \frac{R_{\text{НС}}(T) \cdot R_{\text{YBCO}}(I, T)}{R_{\text{НС}}(T) + R_{\text{YBCO}}(I, T)}. \quad (2.13)$$

Для исследования процесса потери ВТСП обмотками сверхпроводящего состояния в момент короткого замыкания и его возврате после устранения, необходимо учитывать термический процесс нагрева и охлаждения обмоток ВТСП трансформатора. В рамках принятой модели принимается допущение о равномерном распределении температуры по всему объёму сверхпроводника. Количество теплоты, выделяющееся в обмотке в течение переходного процесса, описывается выражением [68]

$$Q(I, T) = \int_0^t I^2 R_{\text{ВТСП}}(I, T) dt. \quad (2.14)$$

Изменение температуры ВТСП обмоток в момент переходного процесса опишем с помощью нестационарного уравнения теплопроводности

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q(I, T) - Aq(\Delta T)}{C_{\Sigma}(T)}, \quad (2.15)$$

где $Q(I, T)$ – количество теплоты, выделяющееся на обмотке, Дж; A – площадь поверхности ВТСП обмотки, м^2 ; $C_{\Sigma}(T)$ – общая теплоемкость ВТСП обмотки, Дж/К; $q(\Delta T)$ – плотность теплового потока в зависимости от разности температур (рисунок 2.15), $\text{Вт}/\text{см}^2$ [69].

Величина плотности теплового потока $q(\Delta T)$ главным образом зависит от разницы температур между поверхностью ВТСП обмотки и криогенной жидкостью (жидким азотом), обеспечивающей ее сверхпроводящее состояние и охлаждение (рисунок 2.15).

Из рисунка 2.15 видно, что максимальная эффективность теплоотвода достигается в режиме пузырькового кипения, который происходит при перепаде температур ΔT , не превышающем 25–30 К. Превышение температуры обмотки выше температуры кризиса кипения жидкого азота (≈ 102 К) инициирует переход к режиму пленочного кипения. Данный режим характеризуется резким снижением эффективности теплоотвода, что может привести к тепловому срыву обмотки (невозможности восстановления сверхпроводящего состояния). При дальнейшем неконтролируемом росте температуры существует вероятность необратимого механического разрушения ВТСП ленты вследствие термических повреждений [70–72].

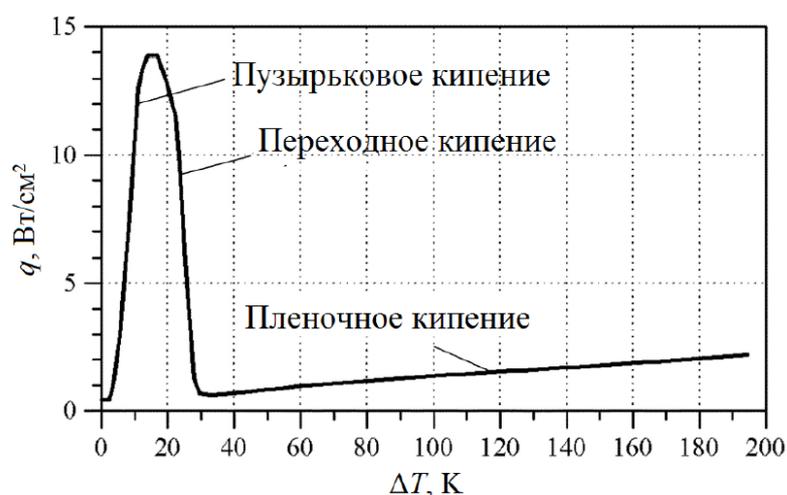


Рисунок 2.15 - Плотность теплового потока в зависимости от разности температур между поверхностью обмотки и криогенной жидкостью

Искомая математическая модель рассматриваемой сети с ВТСП трансформатором (рисунок 2.9) представляет собой систему дифференциальных уравнений (2.9), (2.14) и (2.15), которые необходимо решать совместно

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{U_1 - i(R_{Л1} + R_{ВТСП1}(i, T))}{L_{Л1} + L_1 + L_{Д1}} \\ Q(I, T) = \int_0^t I^2 R_{ВТСП1}(I, T) dt \cdot \\ \frac{dT}{dt} = \frac{Q(I, T) - Aq(\Delta T)}{C_{\Sigma}(T)} \end{cases} \quad (2.16)$$

2.5 Имитационная модель электрической сети с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором, разработанная в среде MATLAB/Simulink

Решение разработанной математической модели было реализовано в программно-вычислительном комплексе MATLAB/Simulink с применением методов численного интегрирования и элементов библиотеки SimPowerSystems. Для решения использовались метод трапеций и метод вращающихся координат (метод Розенброка), которые обеспечивают высокую вычислительную эффективность и точность, адекватную требованиям поставленной задачи.

Для анализа переходных процессов использовались схема замещения в режиме холостого хода (рисунок 2.9) и схема замещения с нагрузкой и возникающим за трансформатором коротким замыканием (рисунок 2.16).

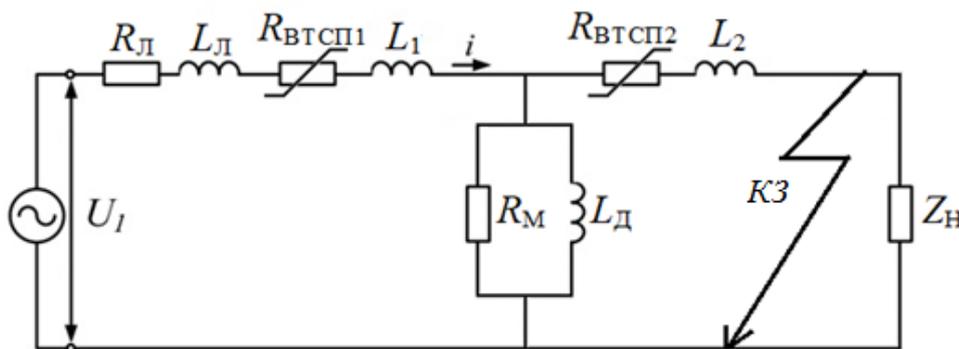


Рисунок 2.16 – Схема замещения моделируемой сети с КЗ за ВТСП трансформатором

При построении имитационной математической модели исследуемой сети с ВТСП трансформатором был использован метод моделирования нелинейных трансформаторов на основе модели идеального трансформатора. Модель представляется блоками источника питающего переменного напряжения « U_1 », активным сопротивлением питающей линии « R_L », индуктивностью питающей линии « L_L », нелинейными активными сопротивлениями обмоток ВТСП трансформатора « $R_{ВТСП1}$ », « $R_{ВТСП2}$ », индуктивностями рассеяния обмоток « L_1 », « L_2 », а также блоками измерения токов, напряжений и температур (рисунок 2.20). Процесс трансформации напряжения и токов реализован с использованием управляемого источника тока обмотки ВН « I_2 » (2.17) и управляемым источником ЭДС обмотки НН « e_2 » (2.18):

$$I_1 = I_2 \cdot K, \quad (2.17)$$

$$e_2 = e_1 \cdot K, \quad (2.18)$$

где e_1 и e_2 - ЭДС первичной и вторичной цепи, В; I_1 и I_2 - токи в первичной и вторичной цепи, А; K - коэффициент трансформации.

Разработанная в среде MATLAB/Simulink математическая имитационная модель исследуемой сети с ВТСП трансформатором представлена на рисунке 2.17. Модель обеспечивает возможность исследования процесса броска тока намагничивания в ВТСП трансформаторе в режимах холостого хода и под нагрузкой, а также анализа электромагнитных и тепловых переходных процессов в сети, содержащей ВТСП трансформатор, в условиях короткого замыкания. В модели учитываются следующие процессы и параметры: насыщение магнитной системы трансформатора, критические параметры сверхпроводящего материала, зависимости удельного сопротивления и теплоемкости слоев ВТСП ленты от температуры, условия выхода обмоток из сверхпроводящего состояния и последующего восстановления сверхпроводимости при включении трансформатора или при коротком замыкании. На разработанную модель получено свидетельство о государственной программе для ЭВМ (Приложение Б).

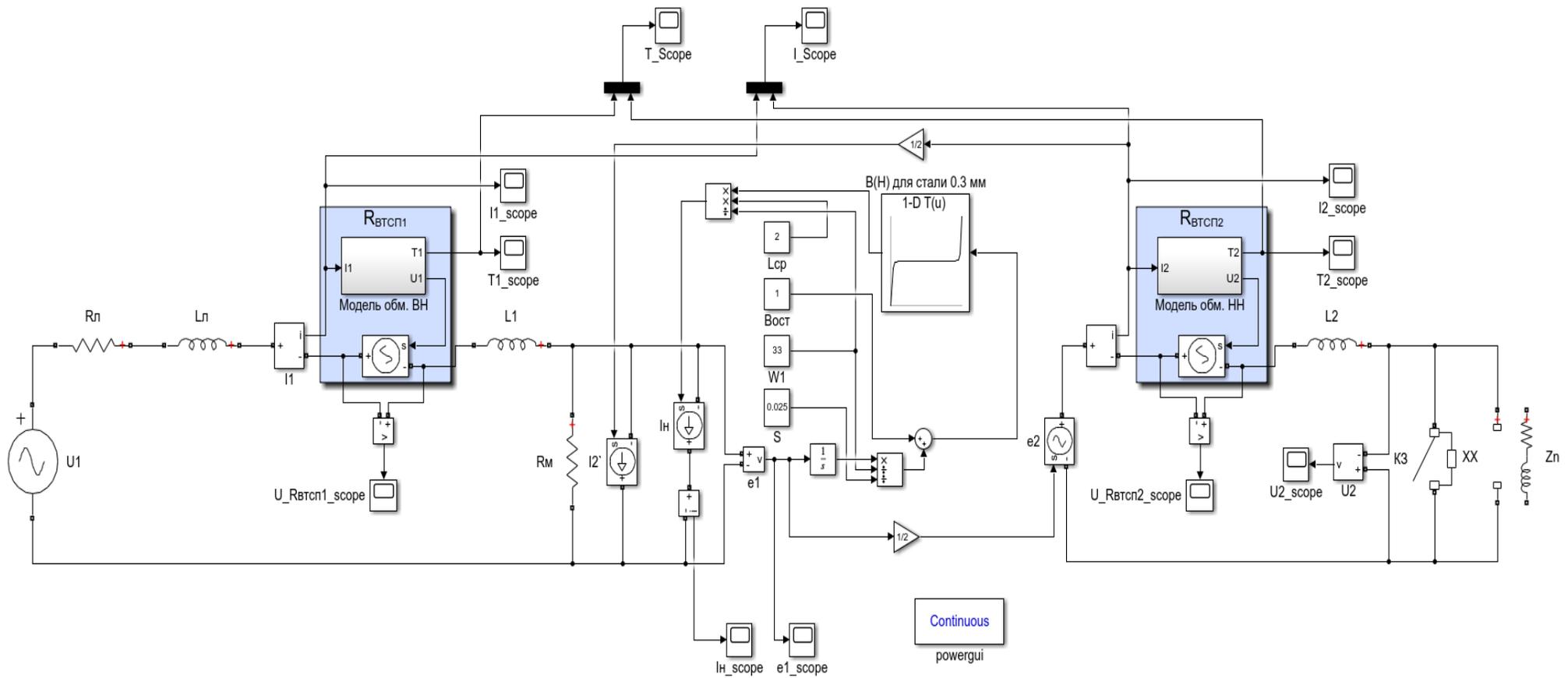


Рисунок 2.17 – MATLAB/Simulink модель исследуемой сети с ВТСП трансформатором

Используя геометрические параметры магнитопровода из холоднокатанной стали марки 3408, данное сопротивление может быть найдено с достаточной точностью по следующей формуле

$$R_M = \frac{l_{\text{ср}}}{\mu\mu_0 S}, \quad (2.19)$$

где μ - магнитная проницаемость, Гн/м; μ_0 - магнитная постоянная равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Подставляя параметры разработанного ВТСП трансформатора в (2.19), получим

$$R_M = \frac{2,012}{1000 * 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,012} = 13,34 \cdot 10^4 \text{ Ом.}$$

Ток намагничивания, представляемый управляемым источником тока, выражается зависимостью

$$I_H = \frac{1}{L_D} \int_0^t e_1 dt, \quad (2.20)$$

где величина дифференциальной индуктивности L_D определяется по кривой намагничивания $B = F(H)$ (рисунок 2.19) [73] для используемого сердечника из электротехнической стали толщиной 0,3 мм марки 3408, в зависимости от текущего значения магнитной индукции B и остаточной магнитной индукции магнитопровода $B_{\text{ост}}$.

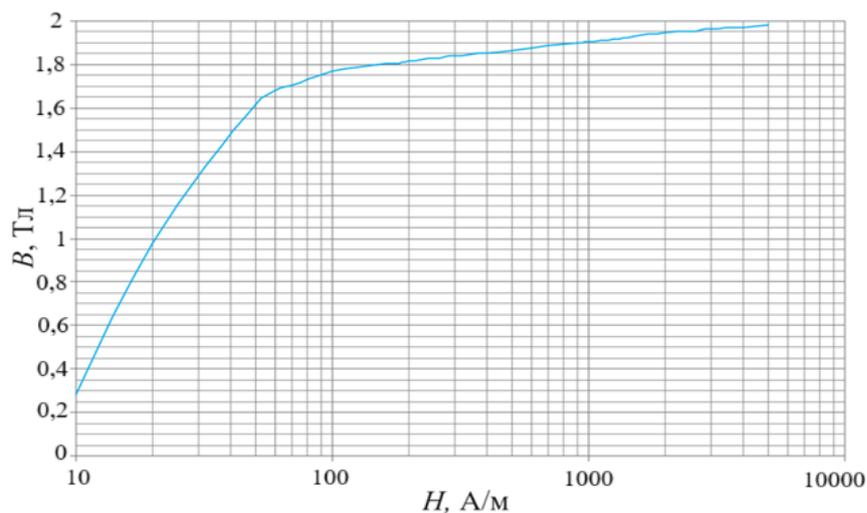


Рисунок 2.19 – Кривая намагничивания сердечника из стали марки 3408

Для получения значений напряженности магнитного поля H на каждом шаге расчета переходного процесса использовалась кусочно-линейная интерполяция приведенной кривой намагничивания (рисунок 2.19).

Значения индуктивностей рассеяния первичной и вторичной обмоток ВТСП трансформатора можно получить по следующей формуле [74]

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} W^2 d \cdot \Phi, \quad (2.21)$$

где W – число витков обмотки; d – диаметр обмотки, м; Φ – величина магнитного потока, Вб, значения которого можно определить по [74, стр. 248, табл. 6.1] в зависимости от отношения $\alpha = a / d$, где a - высота обмотки, м.

Подставляя в (2.21) значения Φ для каждой обмотки, получим

$$L_1 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{4\pi} 33^2 \cdot 0,269 \cdot 9,25 = 270,9 \text{ мкГн},$$

$$L_2 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{4\pi} 11^2 \cdot 0,241 \cdot 9,37 = 27,32 \text{ мкГн}.$$

Модель блоков «R_{ВТСП1}» и «R_{ВТСП2}» моделирующих активное нелинейное сопротивление обмоток ВТСП трансформатора представлена на рисунке 2.20.

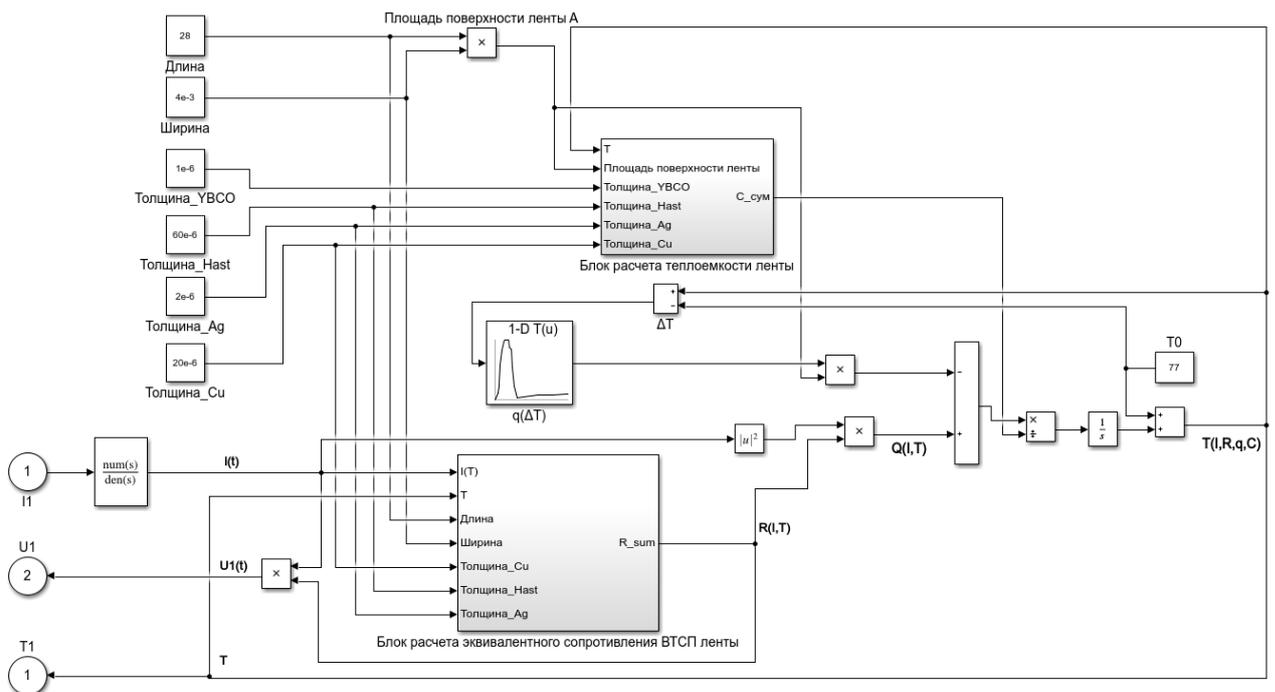


Рисунок 2.20 - Блок, реализующий нелинейное активное сопротивление первичной обмотки ВТСП трансформатора R_{ВТСП1}

Исходными данными для формирования модели активного нелинейного сопротивления обмоток служат: основные параметры обмоток моделируемого ВТСП трансформатора (таблица 2.2), геометрические характеристики ВТСП-ленты, функциональная зависимость критического тока ВТСП ленты от величины внешнего магнитного поля (рисунок 2.14), а также температурные зависимости удельного активного сопротивления и удельной теплоёмкости для каждого слоя ВТСП ленты (рисунки 2.21 и 2.22) [75–78].

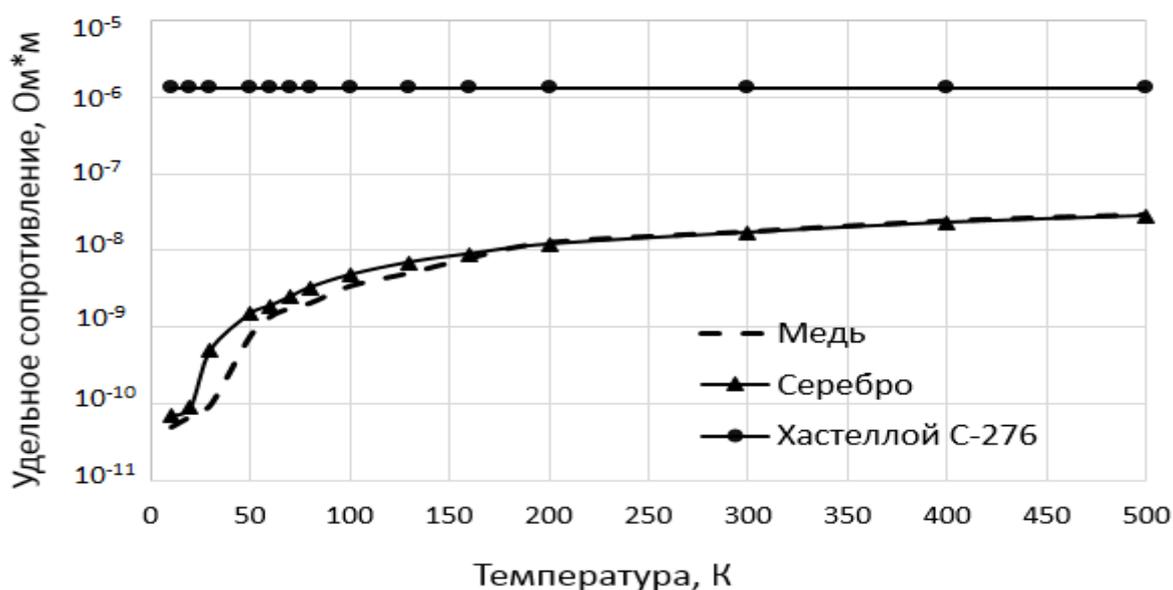


Рисунок 2.21 - Зависимость удельного сопротивления металлов от температуры

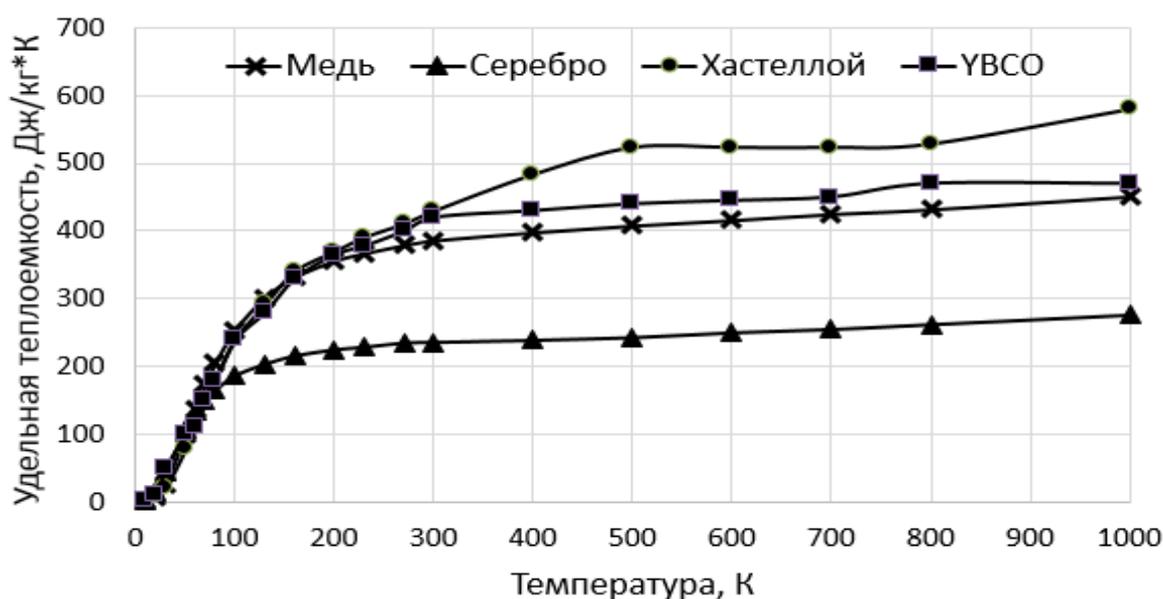


Рисунок 2.22 - Зависимость удельной теплоемкости металлов от температуры

2.6 Моделирование процесса ограничения тока короткого замыкания в сети с экспериментальным прототипом высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора

Для дальнейшего корректного математического описания поведения ВТСП трансформатора в режиме токоограничения необходимо получить осциллограммы тока и напряжения в ВТСП обмотках, трансформатора, а также оценить нагрев обмоток в процессе ограничения тока КЗ при известных условиях эксперимента.

Для получения графиков токов (рисунки 2.23, 2.26, 2.28), напряжений (рисунки 2.24, 2.29) в обмотках трансформатора и изменения температуры ВТСП обмоток (рисунки 2.25, 2.27, 2.30) было проведено математическое моделирование серии процессов с КЗ:

1. ВТСП трансформатор работает на активно-индуктивную нагрузку при номинальном напряжении (питающее напряжение 100 В), через 0,2 секунд происходит КЗ на стороне НН.
2. Ненагруженный ВТСП трансформатор включается на короткое замыкание, при питающем напряжении 120 В.
3. ВТСП трансформатор работает на активно-индуктивную нагрузку с питающим напряжением в 120 В, через 0,2 секунды происходит КЗ на стороне НН, которое отключается в момент времени 0,4 с.

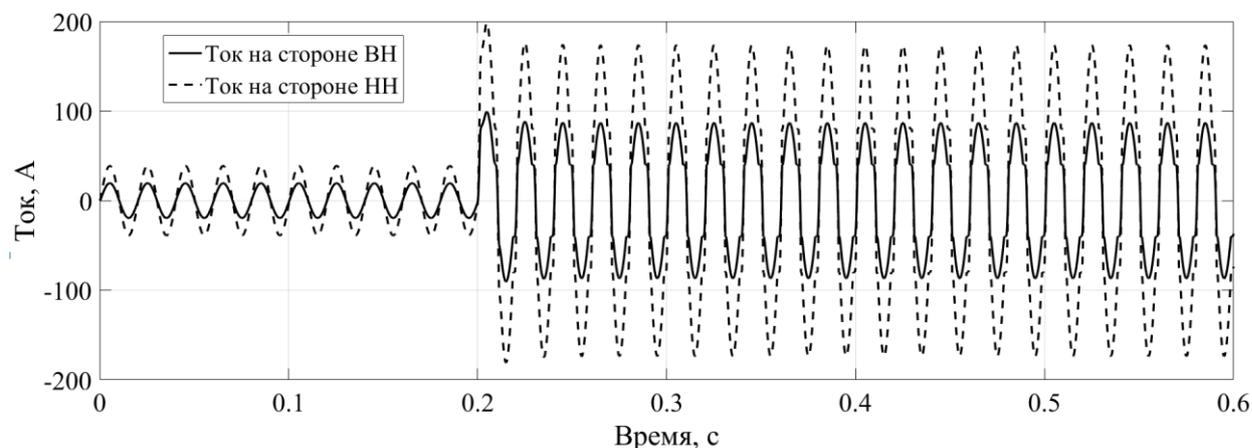


Рисунок 2.23 – Графики токов в сети с ВТСП трансформатором при питающем напряжении 100 В

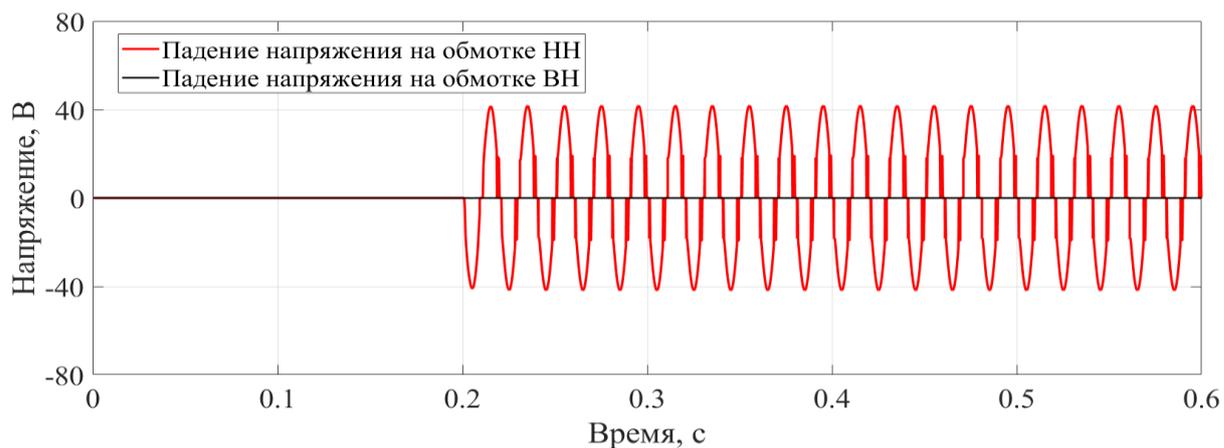


Рисунок 2.24 – Падение напряжения на нелинейном активном сопротивлении ВТСП обмоток при питающем напряжении 100 В

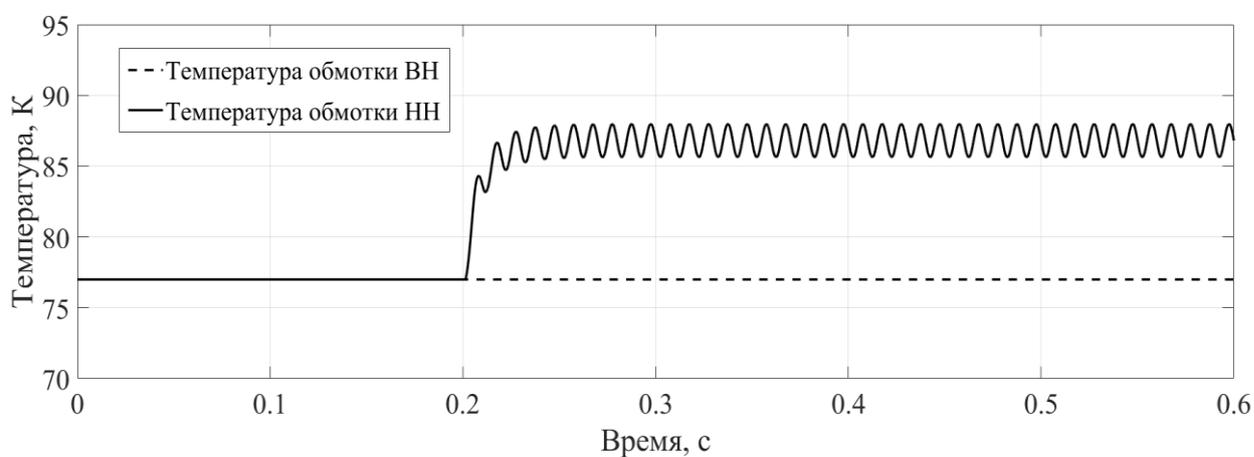


Рисунок 2.25 – Температура ВТСП обмоток при питающем напряжении 100 В

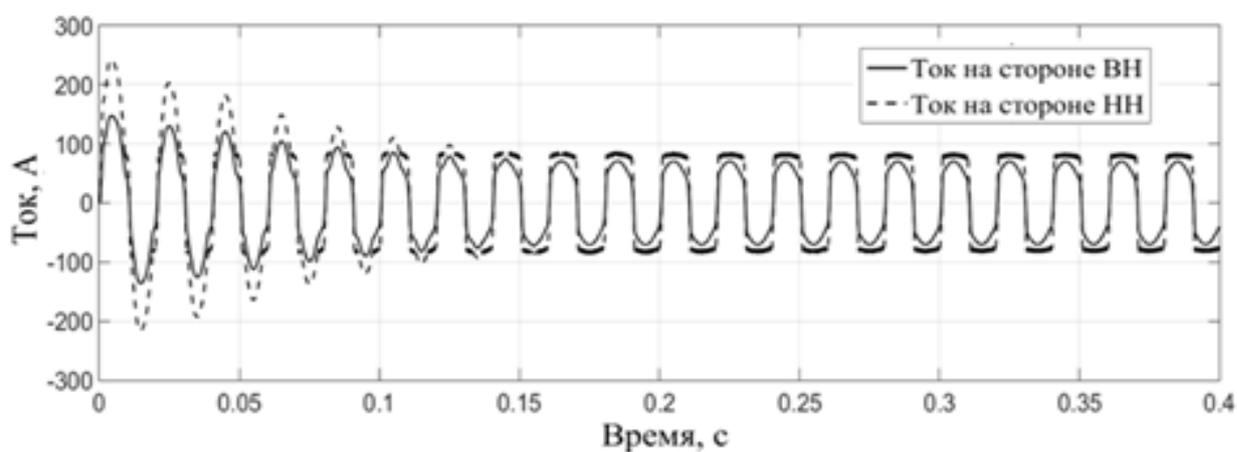


Рисунок 2.26 - Токи в ВТСП обмотках при включении ненагруженного трансформатора на КЗ при питающем напряжении 120 В

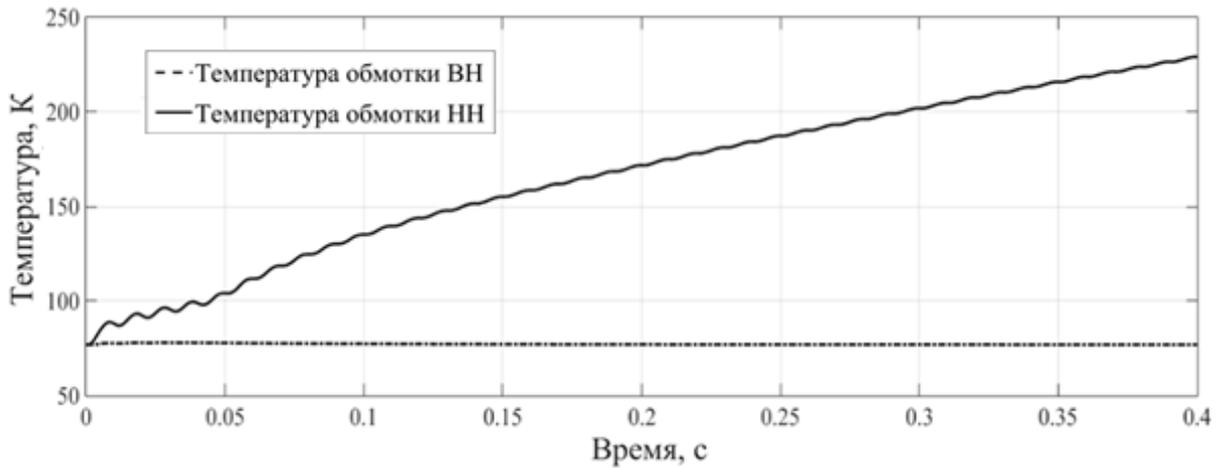


Рисунок 2.27 - Температура ВТСП обмоток при включении ненагруженного трансформатора на КЗ при питающем напряжении 120 В

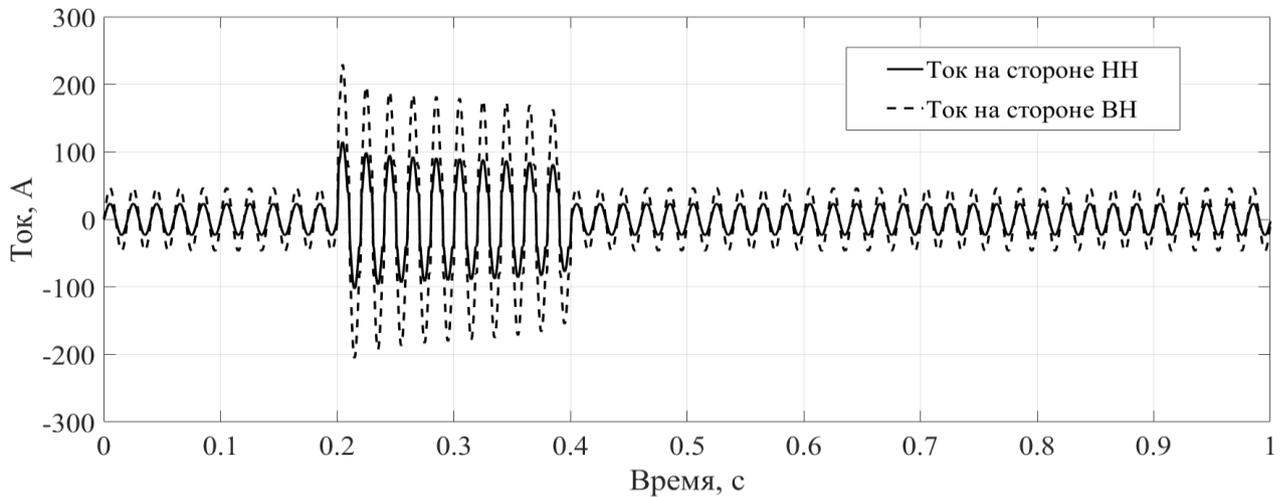


Рисунок 2.28 – Графики токов в сети с ВТСП трансформатором при питающем напряжении 120 В

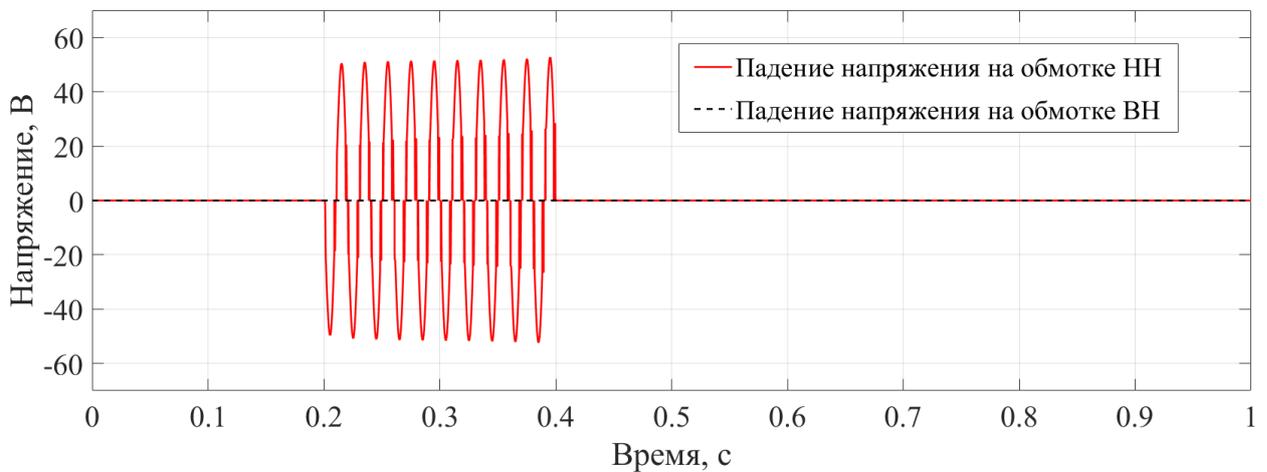


Рисунок 2.29 – Падение напряжения на нелинейном активном сопротивлении ВТСП обмоток при питающем напряжении 120 В

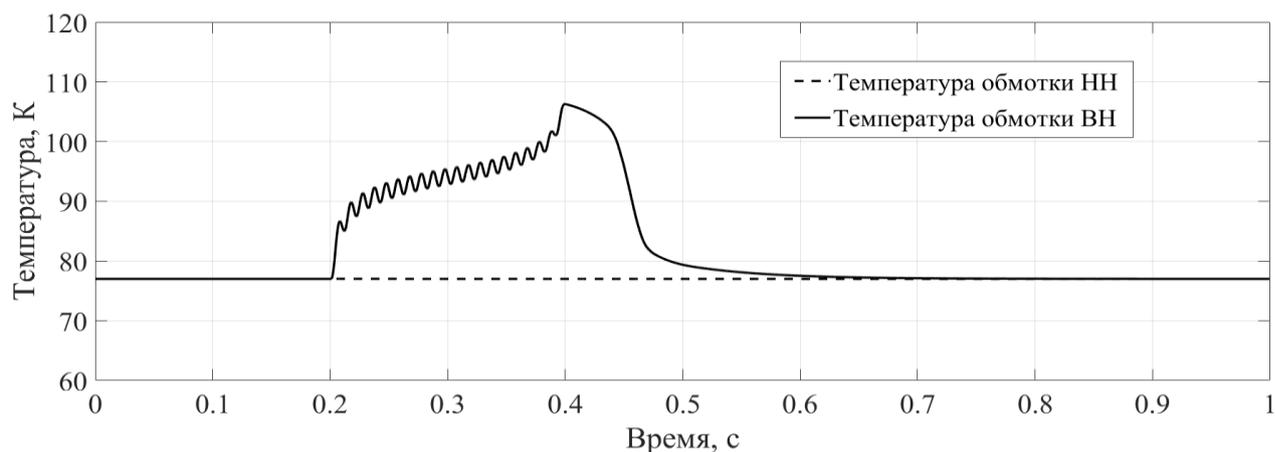


Рисунок 2.30 – Температура ВТСП обмоток при питающем напряжении 120 В

Из форм кривой тока на рисунках 2.23, 2.26, 2.28 видно, что при превышении током критической величины сверхпроводящей ленты, резко возрастает активное сопротивление ВТСП обмотки НН. Об этом свидетельствует появление падения напряжения на обмотке НН (рисунки 2.24, 2.27). Ударный ток КЗ ограничивается возросшим сопротивлением обмотки, которое в дальнейшем продолжает повышаться из-за увеличения температуры провода. Исходя из вышесказанного, в сети с ВТСП трансформатором апериодическая составляющая тока КЗ затухает быстрее, а амплитуда периодической составляющей уменьшается возросшим сопротивлением обмотки. Кроме того, ток в сети (рисунки 2.23, 2.26) достаточно хорошо совпадает по форме с результатами работ других авторов [11, 79], что свидетельствует об адекватности разработанной модели и успешности ограничения тока КЗ.

Рассмотрим процесс нагрева обмотки при ограничении тока КЗ, когда возникновению КЗ предшествует режим работы ВТСП трансформатора на активно-индуктивную нагрузку с питающим номинальным напряжением 100 В.

Из рисунка 2.25 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, т.е. жидкий азот находится в стадии пузырькового кипения и охлаждение происходит максимально эффективно. Однако, в случае второго эксперимента

(рисунок 2.27) происходит неконтролируемое повышение температуры обмотки – тепловой срыв. Этот процесс способен привести к необратимому перегреву ВТСП ленты и спровоцировать ее термическое и механическое повреждения.

Для анализа возможности безопасного восстановления сверхпроводящего состояния обмоток трансформатора после ограничения тока КЗ было проведено моделирование эксперимента, в ходе которого ВТСП трансформатор, работающий на активно-индуктивную нагрузку при повышенном напряжении питания 120 В, подвергся короткому замыканию на стороне низкого напряжения в момент времени 0,2 с. Короткое замыкание самоликвидировалось в момент времени 0,4 с. Результаты моделирования, представленные на рисунках 2.28 и 2.30, демонстрируют, что при своевременном отключении КЗ в обмотках ВТСП трансформатора происходит самостоятельное восстановление сверхпроводимости, что исключает развитие теплового срыва и необходимость принудительного отключения трансформатора для охлаждения и восстановления рабочей температуры обмоток.

Эксперимент показал, что рассчитанные для ограничения тока КЗ обмотки способны возвращать номинальный режим работы после устранения КЗ, достаточно быстро, что говорит о возможности безопасного и эффективного использования функции ограничения тока в режиме АПВ. Также, возможно увеличить скорость охлаждения обмоток, применяя дополнительную циркуляцию криогенной жидкости. Это мероприятие позволит сохранить систему охлаждения в стадии пузырькового кипения и максимально эффективно охладить обмотку.

Для повышения устойчивости ВТСП трансформатора к режиму короткого замыкания предлагается применение в обмотке НН ВТСП лент с увеличенной площадью поперечного сечения и повышенным значением критического тока. Данная мера обоснована результатами моделирования, которые свидетельствуют о доминирующей роли обмотки НН в процессе ограничения токов КЗ. Современные технологические возможности позволяют производить ВТСП ленты шириной 12 мм с критическим током до 600 А. Их применение

обеспечит значительное увеличение токоограничивающей способности трансформатора и повышение тепловой устойчивости его обмоток.

2.7 Подтверждение адекватности разработанной модели физическими экспериментами

Всякая математическая модель требует эмпирической верификации. В данном исследовании в качестве метода валидации использовались физические эксперименты на прототипах сверхпроводящих устройств. Проверка адекватности модели заключается в проведении короткого замыкания в сети с ненагруженным прототипом ВТСП трансформатора. Схема замещения электрической сети для математического моделирования и физического эксперимента совпадает (рисунок 2.31).

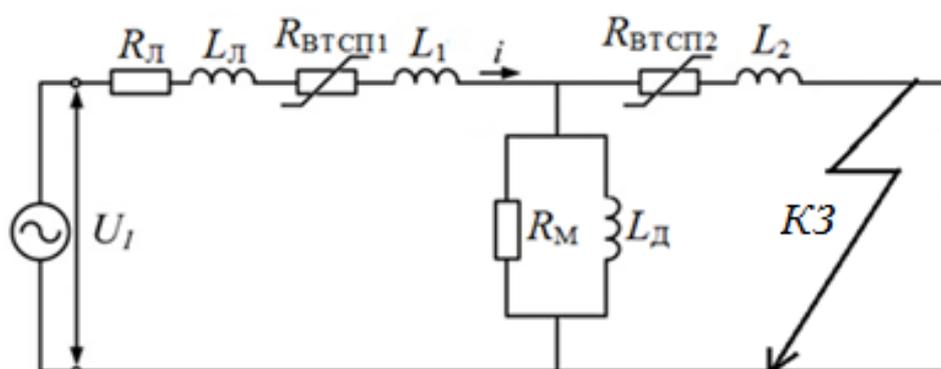


Рисунок 2.31 - Схема замещения эксперимента

На рисунках 2.32 – 2.34 представлены полученные в результате математического моделирования полученные графики токов при подаче на первичную обмотку трансформатора (вторичная обмотка закорочена) напряжений в диапазоне 25 В - 220 В.

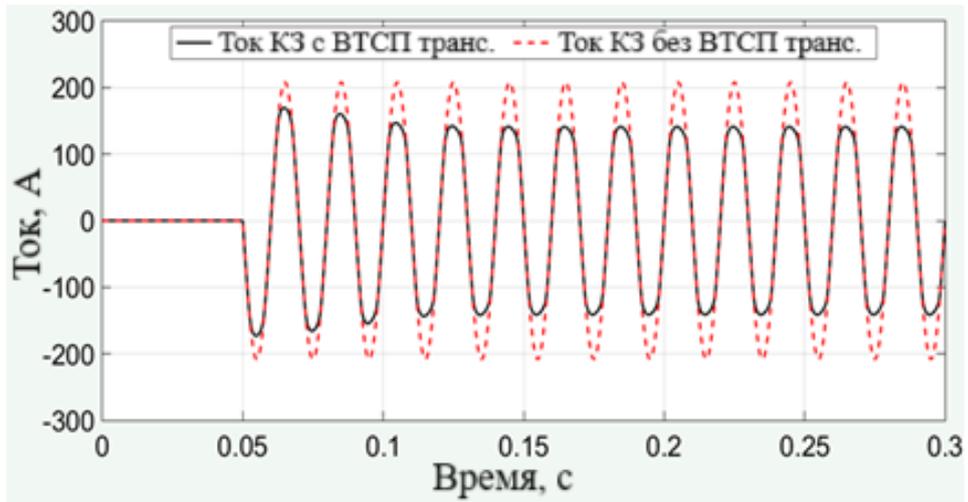


Рисунок 2.32 - Ток в обмотке ВН при питающем напряжении 25 В

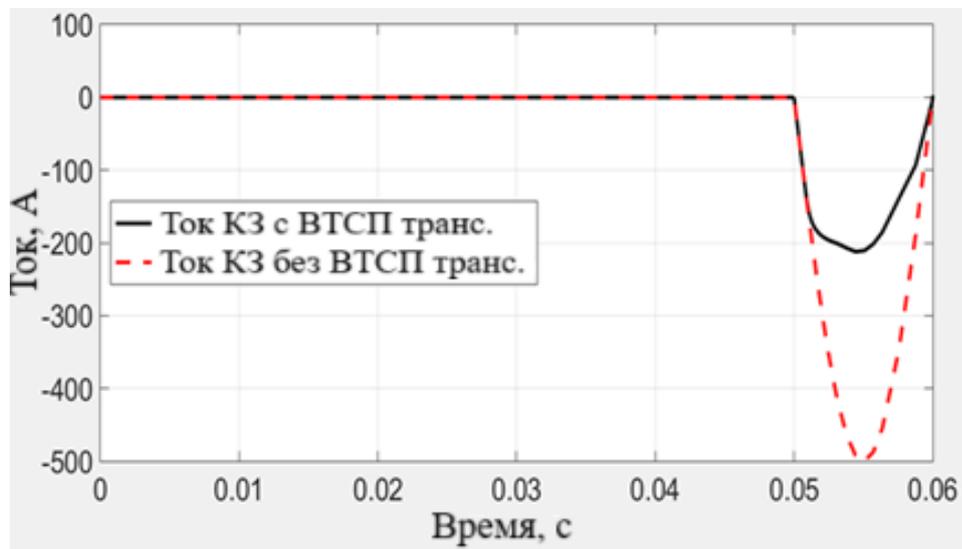


Рисунок 2.33 - Ток в обмотке НН при питающем напряжении 60 В

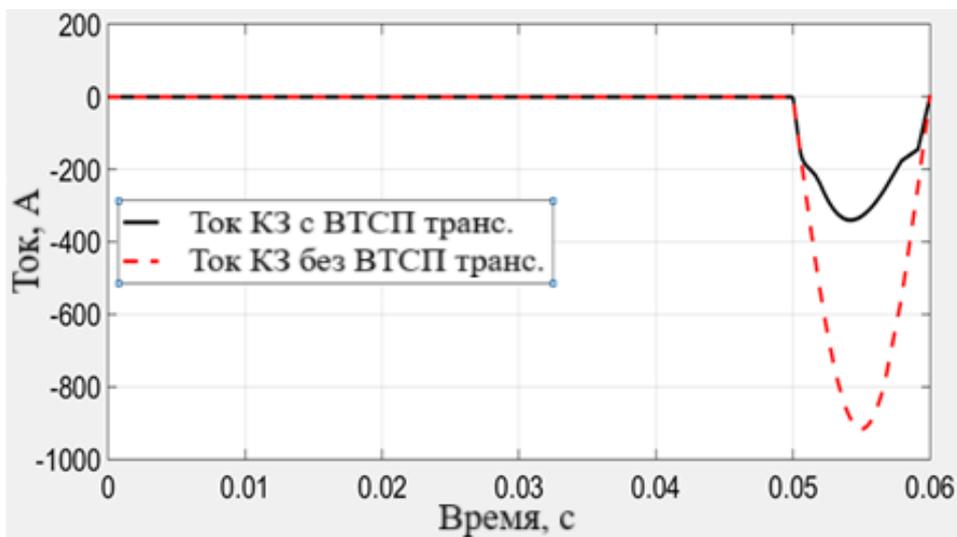


Рисунок 2.34 – Ток в обмотке НН при питающем напряжении 220 В

Выполнена серия экспериментов с включением ВТСП трансформатора через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) с подачей напряжения 25 В напрямую от сети 220 В. Выводы обмотки НН закорочены. Для одновременного снятия кривых напряжения и тока в обмотках трансформатора был использован высокоточный регистратор FLUKE 435-II. Данный аппарат позволяет снимать данные для больших токов с достаточной точностью, что позволило успешно провести эксперименты. Полученные осциллограммы тока и напряжения обмотки НН представлены на рисунках 2.35, 2.36.

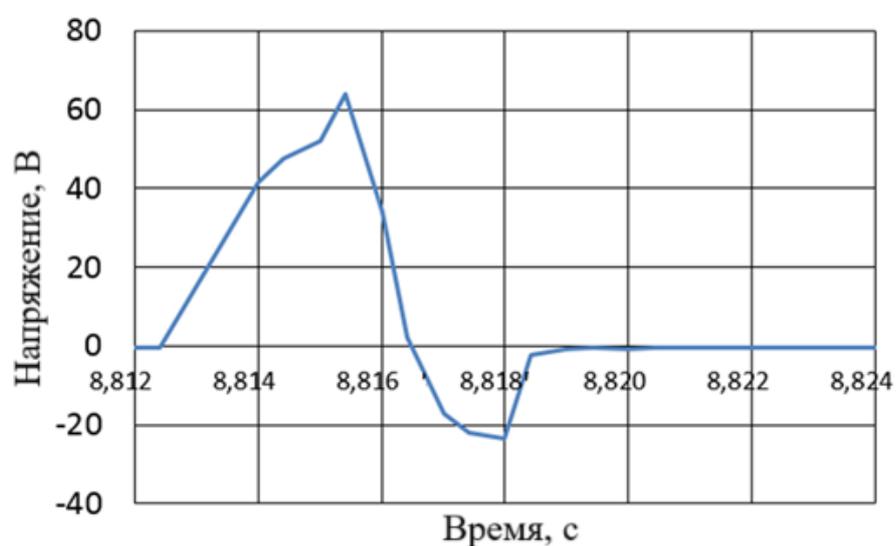


Рисунок 2.35 – Падение напряжения на обмотке НН при КЗ, питающее напряжение - 220 В

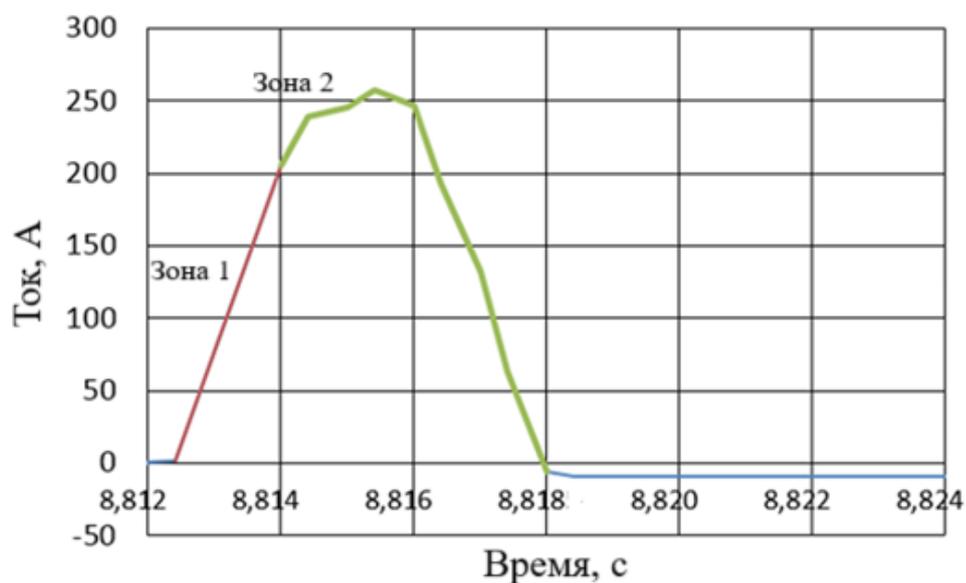


Рисунок 2.36 – Ток в обмотке НН при КЗ, питающее напряжение - 220 В

Появление падения напряжения на обмотке НН (рисунок 2.35) свидетельствует о переходе сверхпроводника в нормальное состояние и резком повышении его активного сопротивления. На осциллограмме тока в обмотке можно видеть, что в момент времени сразу после возникновения короткого замыкания («Зона 1» на рисунке 2.36) 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 рисунок 2.36).

На рисунке 2.37 представлено сравнение результатов эксперимента и математического моделирования процесса токоограничения в сети с ВТСП трансформатором при напряжении на стороне ВН 220 В. Результаты экспериментов в сопоставлении с результатами математического моделирования позволяют считать, что математическая модель адекватно учитывает происходящие физические процессы при протекании тока КЗ через сверхпроводник.

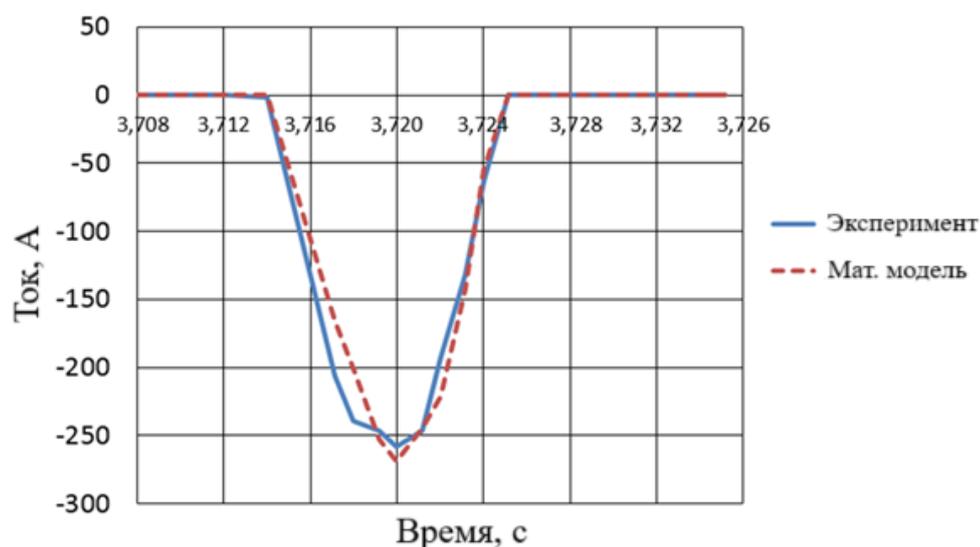


Рисунок 2.37 – Сравнение экспериментальных данных и данных моделирования токов на стороне НН

Анализ полученных осциллограмм позволяет сделать вывод об ограничении ударного тока в 2,95 раза, при условии, что вторичная обмотка

закорочена, напряжение на первичной составляет 220 В. В ходе экспериментов установлено, что степень ограничения тока КЗ зависит от его первоначальной величины, и в свою очередь зависит от поданного напряжения и сопротивления внешней цепи. Установлена зависимость степени токоограничения от отношения тока КЗ к критическому току сверхпроводящих обмоток (рисунок 2.38) [80].

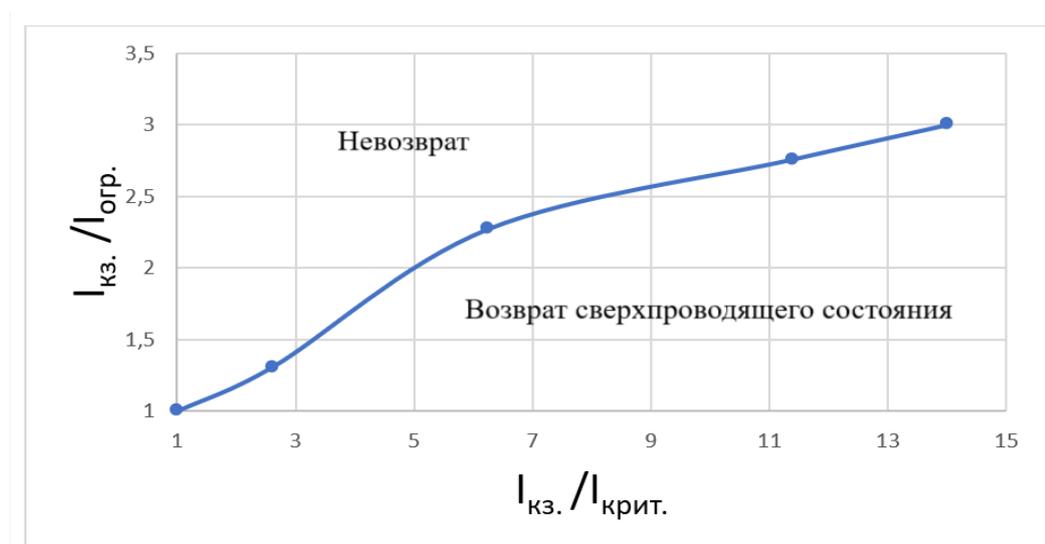


Рисунок 2.38 - Зависимость показателя токоограничения от отношения тока КЗ к критическому току ВТСП

Так как расчётная математическая модель (рисунок 2.17) верифицирована результатами экспериментов, найденную зависимость коэффициента токоограничения от величины тока КЗ можно считать полностью адекватной.

2.8 Экспериментальные исследования и математическое моделирование броска тока намагничивания в высокотемпературном сверхпроводящем трансформаторе при коммутации электрической сети

Каждое резкое изменение напряжения на выводах трансформатора сопровождается переходным состоянием. Такое состояние возникает после включения трансформатора, а также после перепадов напряжения и перебоев электроснабжения. Пусковой ток при включении трансформатора, подобно

магнитному потоку, имеет две составляющие: установившуюся и переходную (рисунок 2.39) [81]. Установившаяся составляющая тока намагничивания представляет собой периодический переменный ток, обеспечивающий создание магнитного потока в магнитопроводе и компенсацию потерь активной мощности в стационарном режиме работы трансформатора. Амплитуда данной составляющей варьируется в пределах 1–10 % от номинального тока. Переходная составляющая пускового тока – это однонаправленный импульс тока, который появляется при насыщении сердечника трансформатора, может превышать номинальный ток в 10 раз.

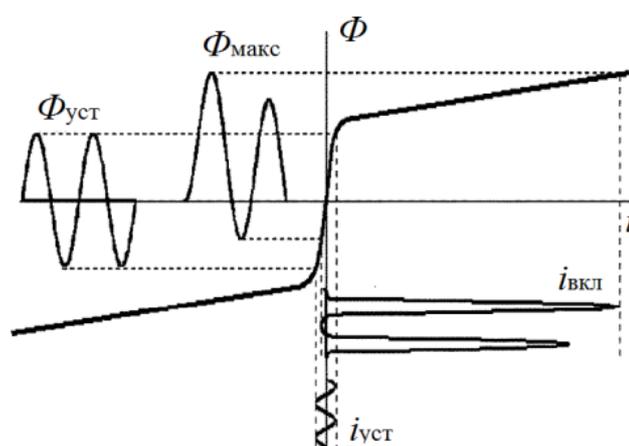


Рисунок 2.39 – Кривая построения пускового тока трансформатора

Явление броска тока намагничивания в трансформаторах с классическими (медными или алюминиевыми) обмотками является хорошо изученным, однако продолжает создавать некоторые эксплуатационные проблемы. Применительно к ВТСП трансформаторам данный процесс остается недостаточно исследованным [61].

Величина пускового тока способна многократно превышать как номинальный ток трансформатора, так и критическое значение тока сверхпроводящих обмоток. При включении ВТСП трансформатора, его обмотки могут потерять сверхпроводящее состояние, что затрудняет безопасное подключение трансформатора к сети, создает риск термического повреждения и нарушения целостности его обмоток. Потеря сверхпроводимости

сопровождается быстрым повышением температуры сверхпроводящей ленты по закону Джоуля-Ленца. Температура обмоток может достигать значительных значений из-за высоких плотностей тока, типичных для этого типа проводника. Эта температура зависит от электрических, тепловых и конструктивных параметров обмоток ВТСП-трансформатора и длительности пускового тока, приведшего к потере сверхпроводимости.

Величина и время затухания пускового тока будут зависеть от многих факторов, важнейшими из которых являются: фаза питающего напряжения трансформатора в момент его включения, величина потока остаточного магнетизма в сердечнике трансформатора при включении под нагрузкой, величина сопротивления обмоток трансформатора.

Для верификации математической модели (рисунок 2.17) и экспериментального исследования броска тока намагничивания разработан физический прототип понижающего силового ВТСП трансформатора с функцией ограничения тока КЗ мощностью 9 кВА и коэффициентом трансформации напряжения равным 3 (рисунок 2.40).

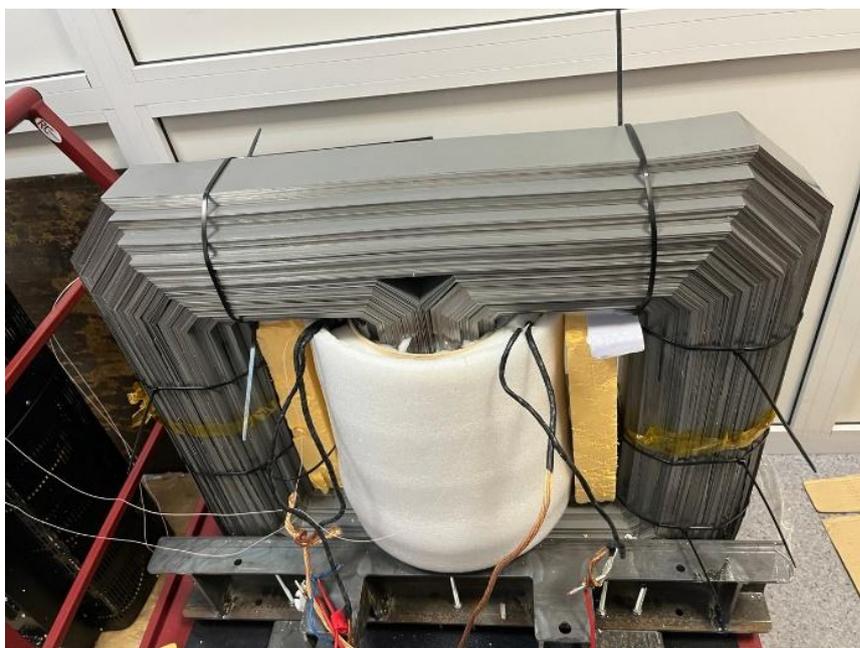


Рисунок 2.40 – Разработанный прототип ВТСП трансформатора с функцией ограничения тока КЗ

Магнитная система выполнена в «теплом» исполнении по технологии «Unicore». Использовалась электротехническая сталь марки 3408 отечественного производства с толщиной листов 0,3 мм и лаковой изоляцией. Обмотки изготовлены из ВТСП ленты второго поколения, производства российской компании «СуперОкс». Обмотки ВН и НН имеют 33 и 11 витков, с толщиной витка 4 мм и 12 мм соответственно. Межвитковая изоляция выполнена из каптона. Обмотки трансформатора размещены в криостате, выполненном из непластифицированного поливинилхлорида с тепловой изоляцией на основе аэрогеля. Технические характеристики разработанного прототипа ВТСП-трансформатора приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Параметры прототипа ВТСП трансформатора

| Параметры обмоток | | |
|--|---|--------------------------|
| Параметр | Первичная обмотка | Вторичная обмотка |
| Материал ВТСП ленты | Y ₁ Ba ₂ Cu ₃ O ₇ | |
| Ширина ВТСП ленты, мм | 4 | 12 |
| Критическая температура ленты, К | 93 | |
| Предел прочности ленты, МПа | 600 | |
| Критический ток ленты, А | 148 | 589 |
| Показатель степени вольт-амперной характеристики | 35 | |
| Рабочая температура, К | 77 | |
| Длина ВТСП ленты YBCO, м | 28 | 8,28 |
| Номинальное напряжение, В | 220 | 73,3 |
| Номинальный ток, А | 40 | 120 |
| Число витков | 33 | 11 |
| Индуктивность, мкГн | 271 | 27 |
| Высота обмоток, мм | 130 | |
| Диаметр обмоток, мм | 226 | 210 |
| Изоляция | Каптон | |
| Диэлектрическая среда | Жидкий азот | |

| Параметры магнитной системы | |
|--|-------------------------------------|
| Материал | Электротехническая сталь марки 3408 |
| Толщина листа, мм | 0,3 |
| Изоляция | Лаковая |
| Коэффициент заполнения | 0,93 |
| Длина средней магнитной линии, м | 2 |
| Поперечное сеч. магнитопровода, м ² | 0,025 |
| Параметры криостата | |
| Высота, мм | 150 |
| Диаметр, мм | 250 200 |
| Материал | НПВХ |
| Теплоизоляция | Аэрогель |

Экспериментальные исследования включали в себя ряд измерений пускового тока ВТСП трансформатора, пуск которого осуществлялся на холостой ход с питающим номинальным напряжением в 220 В. Система измерений, в которой осуществлялись эксперименты, представлена на рисунках 2.41 и 2.42. Регистрация осциллограмм тока и напряжения в первичной цепи осуществлялась посредством высокоточного анализатора качества электроэнергии Fluke 435-II, обеспечивающего фиксацию параметров переходных процессов в исследуемой электрической цепи. Прибор оснащен токовыми клещами, рассчитанными на снятие тока величиной до 6000 А. Полученные данные передавались на персональный компьютер для последующего анализа в специализированной программе PowerLog. Для обеспечения возможности протекания больших токов силовые соединения были реализованы медными проводниками с сечением жилы 16 мм². В качестве источника питания использовался лабораторный автотрансформатор, обеспечивающий выходное напряжение в диапазоне 0 ÷ 600 В.

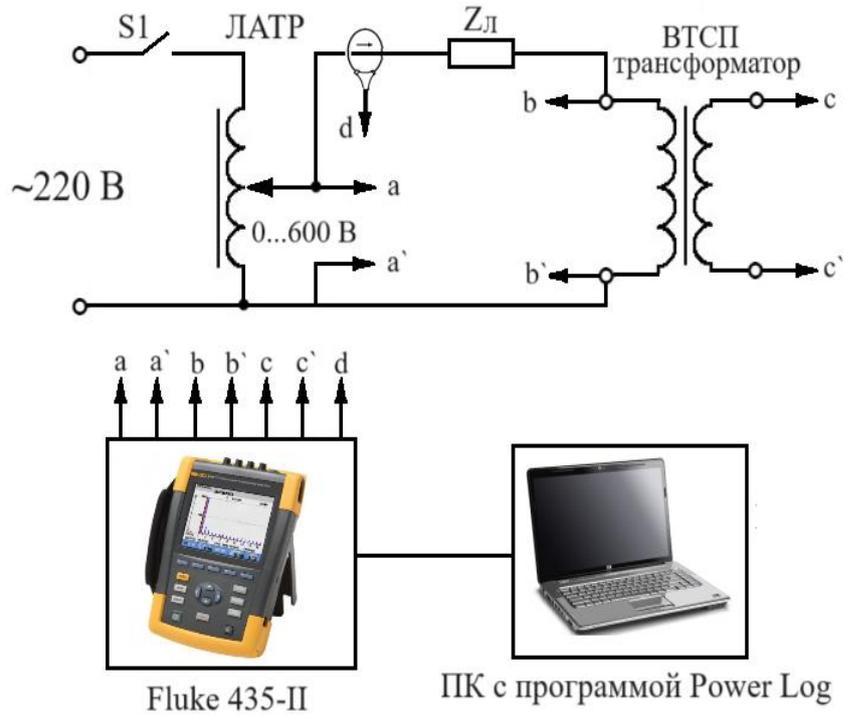


Рисунок 2.41 – Схема экспериментальной сети



Рисунок 2.42 – Внешний вид экспериментальной сети с измерительными приборами

В ходе экспериментов были получены осциллограммы напряжения и броска пускового тока в обмотке ВН (рисунок 2.43).

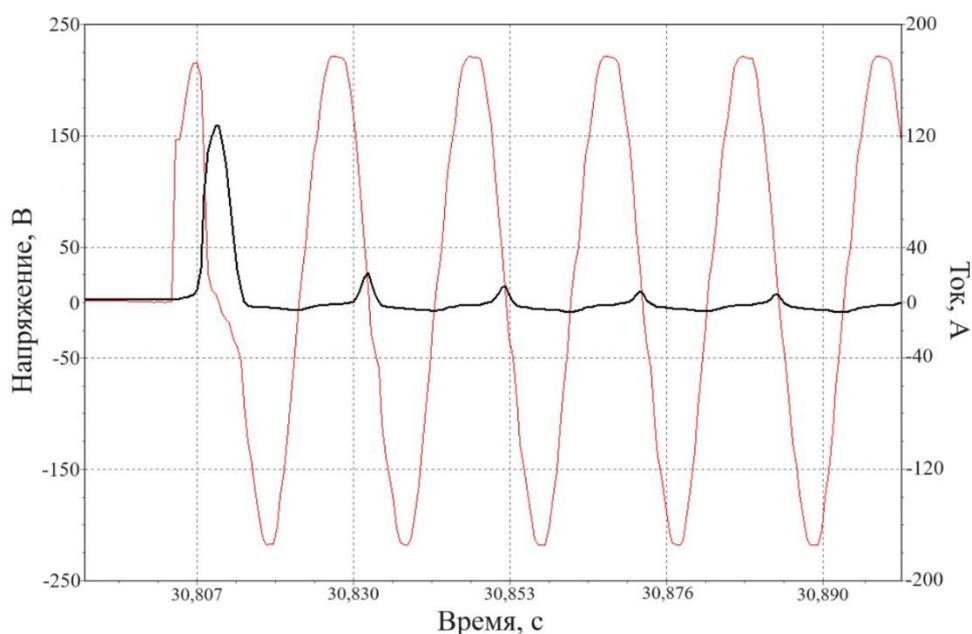


Рисунок 2.43 – Ток и напряжение в обмотке ВН, полученные экспериментально

Верификация разработанной математической модели (рисунок 2.17) осуществлялась сравнением результатов, полученных экспериментально, с результатами моделирования. На рисунках 2.44 и 2.45 представлено сравнение первого пика пускового тока и 5 периодов переходного процесса при включении ВТСП трансформатора на холостой ход. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений максимальных токов в обмотке ВН, зарегистрированных в течение первых пяти периодов после коммутации трансформатора, представлено в таблице 2.4. Величина отклонения для амплитуды первого токового пика составляет 0,72 %, тогда как среднеарифметическое значение отклонения для всего анализируемого временного интервала равно 1,99 %.

Таблица 2.4 - Сравнение максимальных значений пускового тока

| № Периода | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------|--------|-------|------|------|------|
| I_{\max} (Эксперимент), А | 124,35 | 18,93 | 9,21 | 8,01 | 6,15 |
| I_{\max} (Мат. модель), А | 125,25 | 19,55 | 8,87 | 7,78 | 5,93 |
| Отклонение, % | 0,72 | 3,29 | 3,69 | 2,93 | 3,62 |

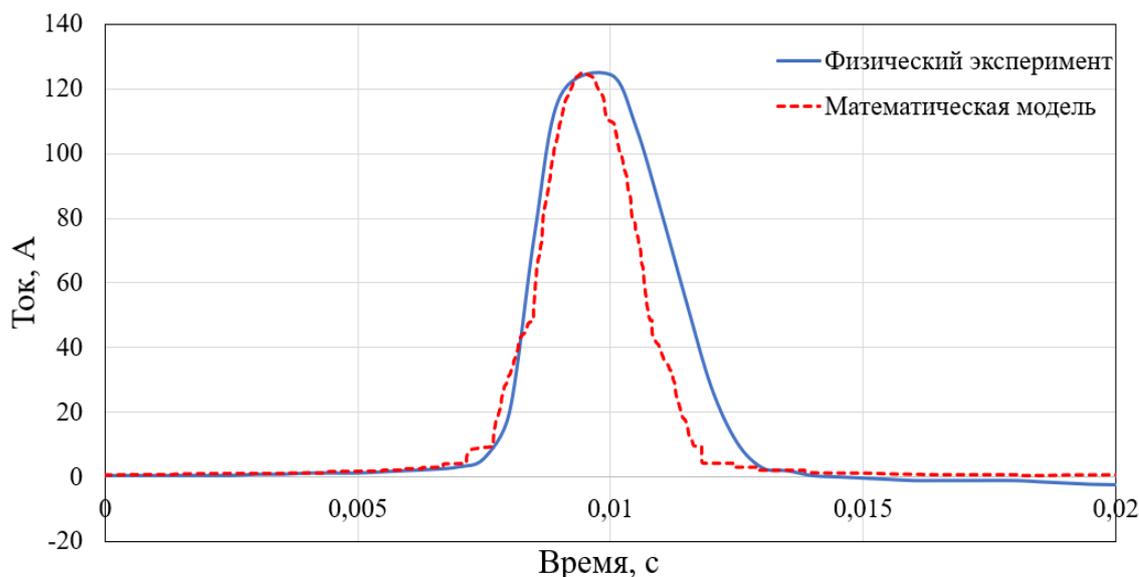


Рисунок 2.44 – Сравнение экспериментальных данных и численного моделирования первого пика броска тока намагничивания

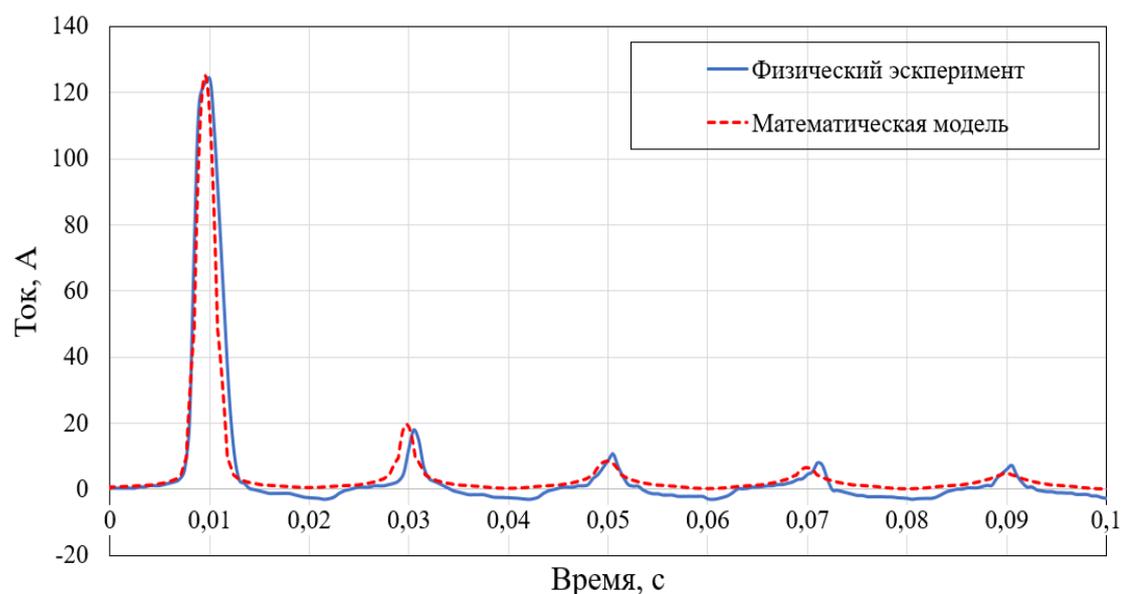


Рисунок 2.45 – Сравнение экспериментальных данных и численного моделирования первых пяти периодов броска тока намагничивания

Проведенный анализ временных зависимостей демонстрирует, что разработанная математическая модель, с достаточной точностью, обеспечивает расчет электромагнитных и тепловых переходных процессов, возникающих при коммутации ВТСП трансформатора в режиме холостого хода.

На следующем этапе было выполнено моделирование включения ВТСП-трансформатора на активно-индуктивную нагрузку 9 кВА при номинальном (220 В) и повышенном (450 В) напряжениях питания. При параметризации модели

установлено значение остаточной намагниченности магнитопровода, равное 1 Тл. Результаты моделирования, представленные на рисунках 2.46-2.49, иллюстрируют временные зависимости тока и температуры в первичной обмотке.

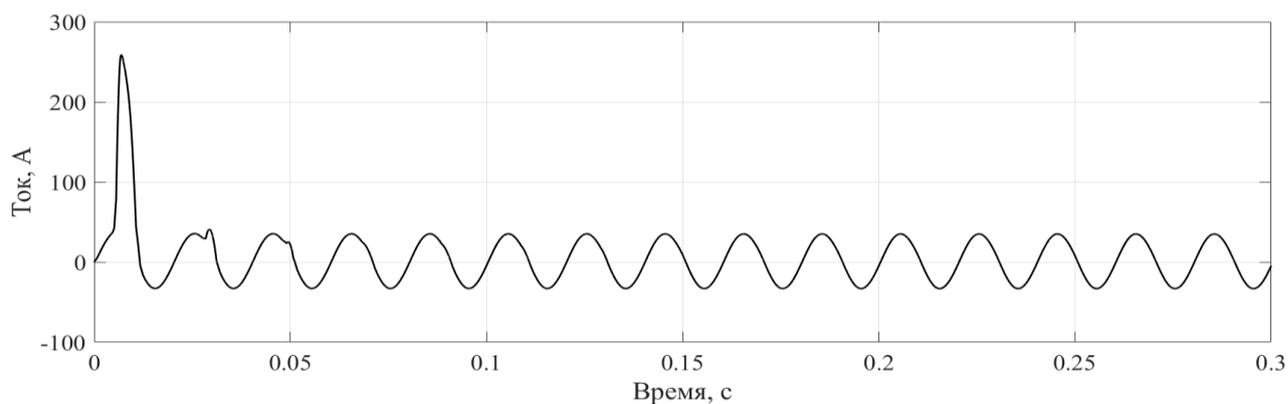


Рисунок 2.46 – Ток в обмотке ВН при включении под нагрузкой, питающее напряжение 220 В, остаточная намагниченность 1 Тл

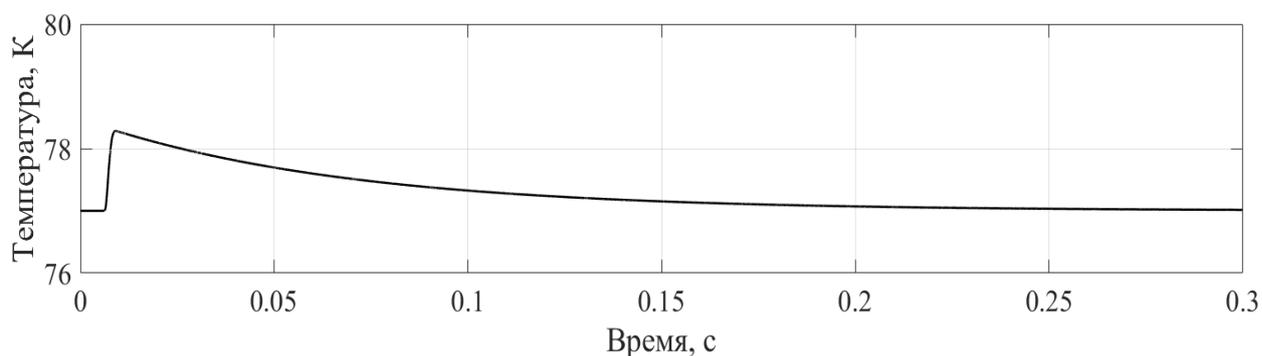


Рисунок 2.47 - Температура обмотки ВН при включении под нагрузкой, питающее напряжение 220 В, остаточная намагниченность 1 Тл

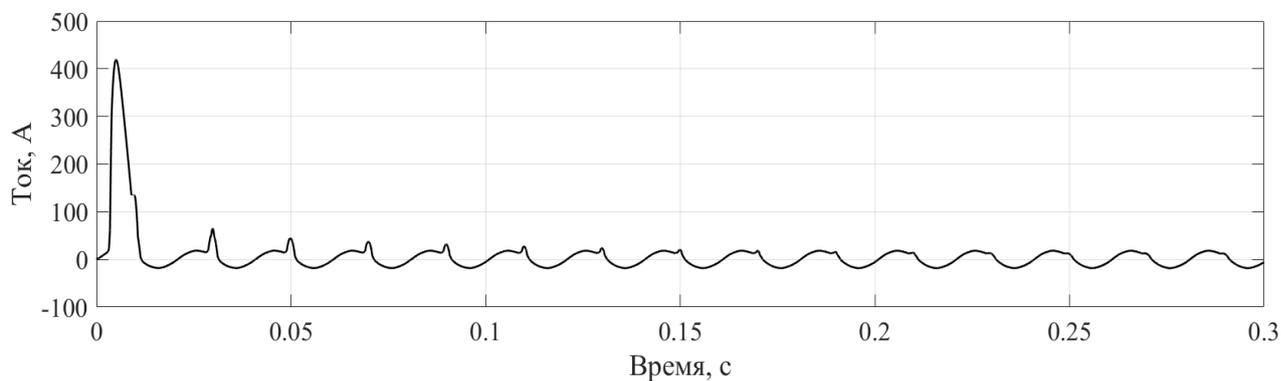


Рисунок 2.48 - Ток в обмотке ВН при включении под нагрузкой, питающее напряжение 450 В, остаточная намагниченность 1 Тл

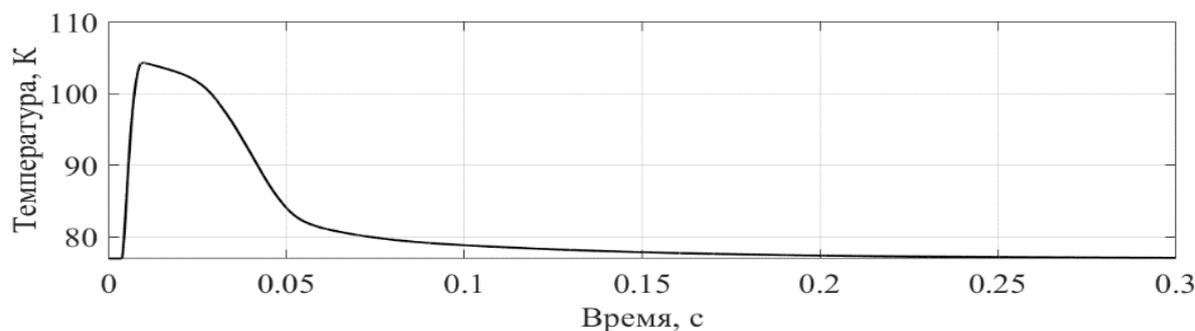


Рисунок 2.49 – Температура обмотки ВН при включении под нагрузкой, питающее напряжение 450 В, остаточная намагниченность 1 Тл

Полученные графики тока в первичной обмотке при включении ВТСП трансформатора на номинальную активно-индуктивную нагрузку, когда напряжение проходит через 0, а в магнитопроводе присутствует остаточная намагниченность 1 Тл (рисунок 2.46) показывают, что бросок пускового тока превысил величину критического тока сверхпроводника, тем самым вызвав потерю сверхпроводимости.

На представленных графиках наблюдается более медленное затухание переходного тока намагничивания относительно классических трансформаторных устройств. Эта особенность объясняется протеканием процесса восстановления сверхпроводимости в обмотках. В установившемся сверхпроводящем режиме временные характеристики затухания переходного процесса определяются параметрами смежной электрической сети. По изменению температуры (рисунок 2.47) видно, что вызванный перегрев весьма незначителен и обмотка достаточно быстро возвращает сверхпроводящее состояние, тем самым, не оказывая влияния на стабильность работы трансформатора и смежного оборудования.

Однако, если произвести коммутацию ВТСП трансформатора на повышенном напряжении, то бросок тока становится более существенным (рисунок 2.48). Температура обмотки при этом (рисунок 2.49) превышает температуру кипения жидкого азота, что при длительном нахождении обмотки в резистивном состоянии может вызвать тепловой срыв и ее термическое и механическое повреждения.

Для оценки влияния фазы напряжения на величину пускового тока ВТСП трансформатора, были получены ряд кривых тока (рисунок 2.50) с диапазоном фазового сдвига от 0° до 90° . Данный эксперимент показывает, что при контроле времени включения трансформатора, можно добиться существенного снижения пускового тока, вплоть до 5-10% от номинального. Такой метод позволяет избежать потерю сверхпроводящего состояния ВТСП обмотки, а также повысить стабильность работы ВТСП трансформаторов.

В качестве альтернативного метода предлагается применение ВТСП лент с увеличенной площадью поперечного сечения и повышенными значениями критического тока (до 600 А). Данный подход обеспечит сохранение сверхпроводящего состояния обмоток при коммутации ВТСП трансформатора как в режиме холостого хода, так и под нагрузкой.

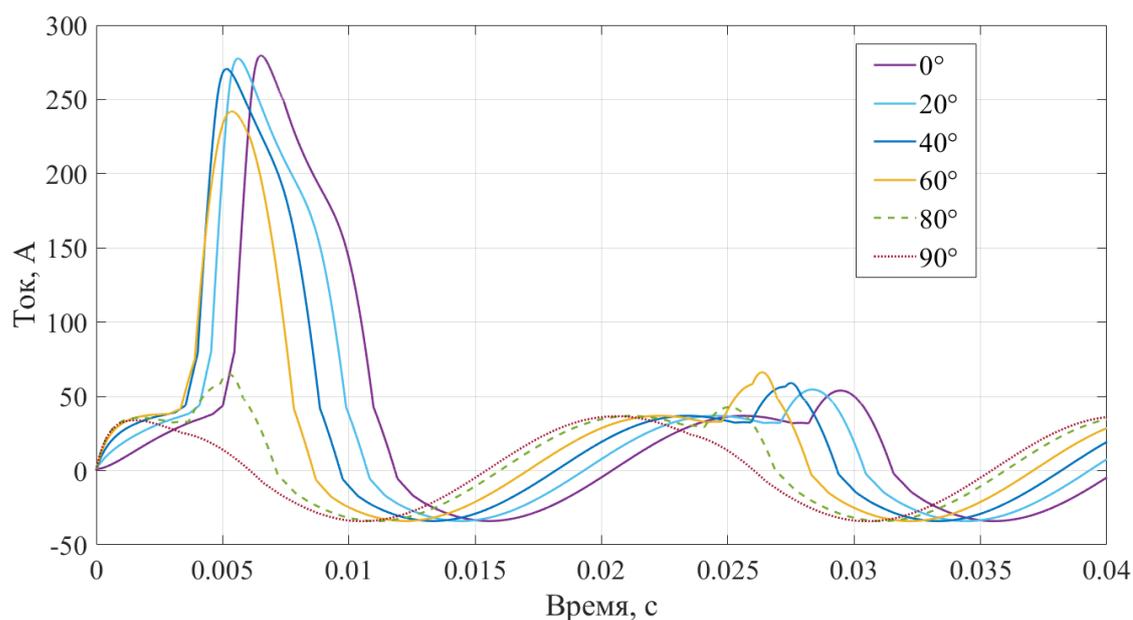


Рисунок 2.50 – Ток в обмотке ВН при различных фазах напряжения в момент включения

Выводы по главе 2

1. Разработанная математическая модель (2.16), реализованная в ППК Matlab/Simulink (рисунок 2.17), позволяет рассчитывать параметры электромагнитных и тепловых переходных процессов при включении ВТСП

трансформатора и при коротком замыкании, с учетом основных электрических, магнитных и тепловых параметров элементов электрической сети, критических параметров сверхпроводника, особенности системы охлаждения жидким азотом. На основе данной модели определен характер электротеплового поведения устройства, при допущении, что обмотки устройства являются сосредоточенными элементами с изотропностью свойств ВТСП ленты и окружающего хладагента.

2. Предложенная математическая модель верифицирована натурными экспериментальными исследованиями на двух физических моделях однофазных силовых понижающих ВТСП трансформаторов с функцией ограничения тока КЗ. Результаты экспериментов с достаточной точностью совпадают с результатами численного моделирования.

3. Сконструировано два образца силовых ВТСП трансформаторов с функцией ограничения тока КЗ. Доказано, что трансформаторы с ВТСП обмотками возможно применять для ограничения токов короткого замыкания в ЭЭС. Полученные в работе результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают высокую эффективность токоограничивающей функции.

4. Проведены натурные и теоретические эксперименты короткого замыкания на вторичной обмотке ВТСП трансформатора. Получена оценка снижения ударного тока КЗ в 2,95 раз, при этом при проектировании и эксплуатации ВТСП трансформаторов надо учитывать ограничения, связанные с большим тепловыделением в обмотках при коротком замыкании, способном привести к необратимому перегреву ВТСП ленты с ее термическим и механическим повреждением.

5. Бросок тока намагничивания при включении ВТСП трансформаторов может значительно превышать величину критического тока сверхпроводника и вызывать потерю сверхпроводящего состояния обмоток. Длительная потеря сверхпроводимости под нагрузкой, способна привести к термическому разрушению обмотки. Предлагается использование системы с

контролем момента включения, что позволит снизить пусковой ток до значений 5-10% от номинального.

6. Определены меры по обеспечению тепловой стабильности обмоток при ограничении тока КЗ и включении ВТСП трансформатора под нагрузкой. Эксперименты показали, что рассчитанные для ограничения тока КЗ обмотки способны возвращать номинальный режим работы сети, после устранения КЗ, достаточно быстро. Это свидетельствует о возможности безопасного и эффективного использования функции ограничения тока в режиме АПВ.

7. Снижение времени охлаждения обмоток возможно применением дополнительной циркуляции криогенной жидкости. Это мероприятие позволит сохранять систему охлаждения в стадии пузырькового кипения и эффективно охлаждать обмотку. Предлагается также использовать в качестве обмотки ВТСП ленты с увеличенным поперечным сечением и высокими значениями критического тока (до 600 А). Это мероприятие позволит избежать потери сверхпроводимости и повысить тепловую устойчивость обмоток.

3 ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ

3.1 Постановка задачи

Электрические параметры силовых трансформаторов играют большую роль в расчете и исследовании режимов работы и устойчивости электроэнергетических систем. Они оказывают существенное влияние на потери активной и реактивной мощности, на отклонение уровня напряжения при трансформации, а также на ограничение тока КЗ (в случае использования ВТСП обмоток). На сегодняшний день научным сообществом еще не выработаны устоявшиеся методы и принципы проектирования ВТСП трансформаторов. Анализ мировых и отечественных разработок позволяет дать рекомендации к определению основных электрических параметров и проектированию ВТСП трансформаторов [50, 82, 83].

Для корректного математического описания электромагнитных и тепловых переходных процессов необходимо адаптировать разработанные математические модели для исследования процесса ограничения тока КЗ в трехфазных электрических сетях. В настоящем разделе ставится задача моделирования и анализа использования ВТСП трансформаторов для ограничения ударных токов трехфазного, двухфазного коротких замыканий. При этом необходимо оценить влияние на уровень ограничения показателя степени вольт-амперной характеристики ВТСП, определить критерии возврата трансформатора в сверхпроводящее состояние в зависимости от длительности короткого замыкания и бестоковой паузы.

Для оценки целесообразности применения ВТСП трансформаторов с расщепленной обмоткой низкого напряжения необходимо провести сравнительный анализ с трансформаторами традиционного исполнения.

3.2 Параметры силовых высокотемпературных сверхпроводящих трансформаторов с функцией токоограничения, влияющие на режим электрической сети

В настоящем разделе предложены рекомендации к определению основных электрических параметров ВТСП трансформатора с учетом природы потерь энергии в сверхпроводниках, обоснованных в работе требований к плотности тока, специальным параметрам сверхпроводящих лент, токоограничивающей функции.

3.2.1 Плотность тока и магнитная индукция сердечника

Основным конструктивным отличием ВТСП трансформаторов в сравнении с классическими являются материалы обмоток. В большинстве созданных прототипов сверхпроводящих трансформаторов используются ленты, созданные на основе сверхпроводников второго рода. Толщина типичной ВТСП ленты составляет всего 0,1-0,2 мм. В тоже время средняя рабочая плотность тока ВТСП лент может достигать 600 А/мм^2 , в зависимости от ширины ленты. Использование высокотемпературных сверхпроводников, плотность тока которых более чем на два порядка превышает характеристику классического медного проводника позволяет существенно снизить габариты трансформаторного оборудования и, в то же время, в разы повысить пропускную способность устройства.

Однако при выборе расчетных величин плотности тока и индукции магнитной системы трансформатора необходимо учитывать зависимость критической плотности тока J_K от магнитной индукции B [84]. Дело в том, что при воздействии внешних магнитных полей (например, от сердечника) критическая плотность тока уменьшается. Без учета этого фактора невозможно спроектировать ВТСП трансформатор с эффективной токоограничивающей функцией, а неверный выбор рабочей плотности тока и номинальных токов трансформатора способен привести к непредвиденной потере

сверхпроводимости и возможному термическому повреждению обмоток. На рисунке 3.1 для сверхпроводящей ленты из YBCO материала приведены зависимости $J_K(B)$ для установленного диапазона температур [85].

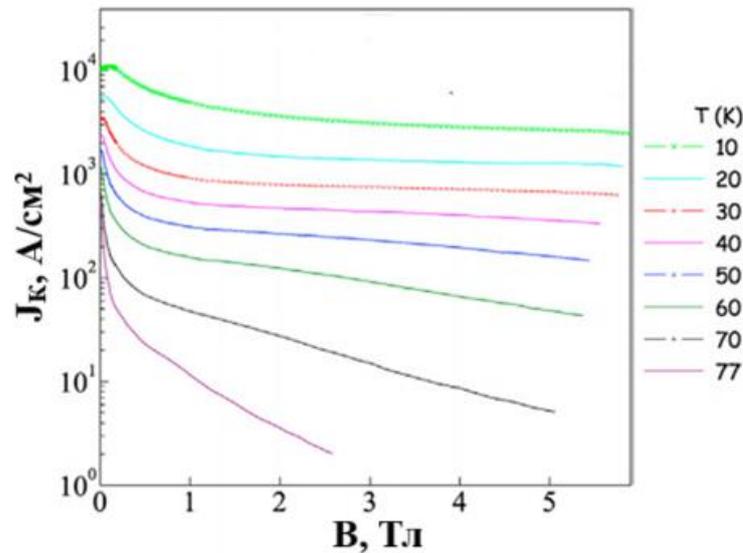


Рисунок 3.1 – Зависимость критической плотности тока от магнитной индукции при разных температурах

Для снижения деградации критических параметров ВТСП обмоток под воздействием магнитного поля, обусловленной зависимостью $J_K(B)$, целесообразно ограничивать рабочую индукцию в магнитной системе значениями 1,4–1,7 Тл [86]. Данный подход обеспечивает достижение высоких значений критической плотности тока в сочетании с оптимальными показателями тока холостого хода и магнитных потерь.

Предложенный диапазон магнитной индукции расширяет возможности выбора материалов магнитопровода, допуская использование различных марок холоднокатаной, горячекатаной и аморфной электротехнических сталей. Также существует возможность расчета трансформатора для достижения наименьших значений критического тока с целью установки таких ВТСП трансформаторов в районы с проблемами частого возникновения коротких замыканий. Однако следует помнить, что чрезмерное (более 1,7 Тл) повышение магнитной индукции вызывает высокие значения потерь в магнитной системе. Для ВТСП трансформаторов магнитные потери являются превалирующими, поскольку в

номинальном режиме активное сопротивление обмоток практически равно нулю [87].

3.2.2 Потери в высокотемпературном сверхпроводящем трансформаторе

Классическая теория трансформаторостроения разделяет потери в трансформаторах на два основных вида: электрические потери (потери в обмотках) и магнитные потери (потери в сердечнике). В ВТСП трансформаторах потери в магнитной системе рассчитываются классическими методами, а природа потерь в обмотках отличается. В работах [87-90] проведен анализ потерь в ВТСП обмотках при протекании переменного тока промышленной частоты. Отмечается магнитная природа возникновения этих потерь, а их величина зависит от силы воздействия и направления переменного магнитного поля. В соответствии с природой источника переменного магнитного поля, потери в сверхпроводнике подразделяются на две составляющие:

- 1) потери, индуцированные собственным магнитным полем, которое обусловлено током, протекающим через проводник;
- 2) потери, вызванные внешним магнитным полем, создаваемым рассеянием соседних обмоток или внешними источниками.

Для количественной оценки потерь, возникающих под воздействием собственного магнитного поля ВТСП обмотки, предлагается использовать следующее аналитическое выражение [91]:

$$\Delta P_{СМ}(I_T) = \frac{f \mu_0 I_C^2}{2\pi} \left[\left(2 - \frac{I_T}{I_C} \right) \frac{I_T}{I_C} + 2 \left(1 - \frac{I_T}{I_C} \right) \ln \left(1 - \frac{I_T}{I_C} \right) \right], \quad (3.1)$$

где I_C – критический ток сверхпроводника, А; I_T – транспортный ток (максимальный ток в проводнике), А; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; f – частота в сети, Гц.

По выражению (3.1) можно оценить величину потерь от воздействия собственного поля ВТСП обмотки, намотанной одиночным проводником. При намотке несколькими параллельными ВТСП лентами изменяется распределение

магнитных полей. В [92] была выведена зависимость потерь в высокотемпературном сверхпроводнике от количества параллельных лент в обмотке (рисунок 3.2). Показано, что при использовании более 4-х параллельных проводников, потери от собственного поля существенно увеличиваются.

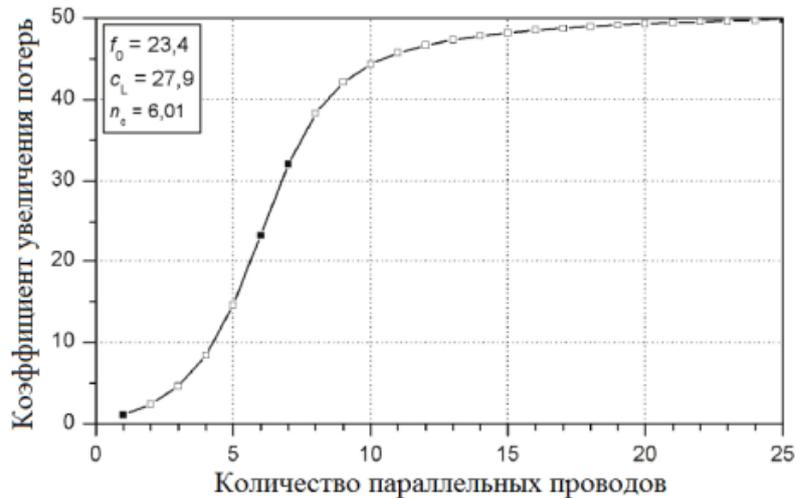


Рисунок 3.2 – Зависимость коэффициента потерь от числа параллельных проводов

Принимая во внимание зависимость (рис. 3.2) потери от воздействия собственного магнитного поля при различном количестве параллельных проводников в обмотке следует рассчитывать, как:

$$\Delta P_{СП} = 3(n_{ВН} \cdot k \cdot \Delta P_{СП1}(I_{ТВН}) + n_{НН} \cdot k \cdot \Delta P_{СП1}(I_{ТНН})), \quad (3.2)$$

где $n_{ВН}$ и $n_{НН}$ – число параллельных ВТСП лент в обмотке ВН и НН, k – коэффициент потерь, для используемого количества параллельных ВТСП лент.

Вследствие слоистой структуры и высокой анизотропии ВТСП материалов, переменное магнитное поле, приложенное в перпендикулярном направлении к поверхности ленты, индуцирует более значительные потери в сравнении с параллельной ориентацией поля. Выделяют два типа потерь от внешнего поля: на гистерезис и на вихревые токи.

Для определения потерь на гистерезис воспользуемся следующим выражением [93]:

$$\Delta P_{Г} = I_C a_{ВТСП} B f, \quad (3.3)$$

где $a_{ВТСП}$ – ширина ВТСП ленты, м.

Наведенные в несверхпроводящих слоях ВТСП ленты потери на вихревые токи [94]:

$$\Delta P_{Вихр} = \frac{\pi^2 b_{Me} a_{Me}^3}{6\rho} (Bf)^2, \quad (3.4)$$

где b_{Me} – толщина слоев ВТСП ленты, состоящих из металлов, м; a_{Me} – ширина слоев ВТСП ленты, состоящих из металлов, м; ρ – удельное электрическое сопротивление металлических слоев, Ом·м.

Помимо потерь от воздействия магнитных полей, называемых потерями переменного тока, в токовводах ВТСП трансформатора и местах спайки ВТСП лент возникают тепловыделения, создающие дополнительные потери [91]:

$$\Delta P_{Ввод} = \frac{I^2}{A_{Ввод}} \int_0^l \rho_{Ввод}(x) dx + A_{Ввод} \lambda_{Ввод}(T) \frac{dT}{dx}, \quad (3.5)$$

где I – ток, А; l – длина токоввода, м; $A_{Ввод}$ – площадь поперечного сечения токоввода, м²; $\rho_{Ввод}$ – удельное сопротивление токоввода, Ом·м; $\lambda_{Ввод}$ – коэффициент теплопроводности токоввода, Вт/(м·К) T – температура токоввода, К.

Незначительные тепловые потери проходят через стенки криосистемы ВТСП трансформатора. В зависимости от мощности и конструкции магнитной системы трансформатора криостаты должны обеспечивать диапазон рабочих температур 60-77 К для эффективного охлаждения ВТСП обмоток, при этом теплопритоки через криостаты для любого ВТСП устройства не должны превышать 2,5 Вт/м² [91].

Общие потери в ВТСП обмотках:

$$\Delta P_{КЗ} = \Delta P_{СП} + \Delta P_{ВП} + \Delta P_{Ввод} + \Delta P_{Крио}, \quad (3.6)$$

Для расчета магнитных потерь в магнитной системе ВТСП-трансформатора применима классическая методология [63]. В исследованиях [51, 91] проведен сравнительный анализ суммарных потерь мощности в традиционном трансформаторе с медными обмотками (рисунок 3.3, а) и ВТСП-

трансформаторе (рисунок 3.3, б). Результаты демонстрируют, что в режиме холостого хода потери в ВТСП устройстве составляют 50%, а в номинальном режиме при полной нагрузке — лишь 10% от потерь в классическом трансформаторе эквивалентной мощности.

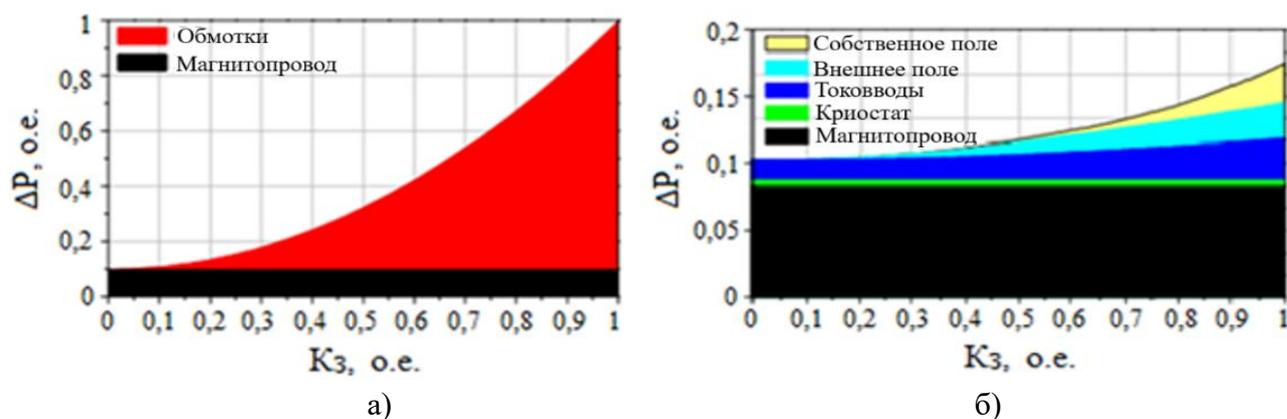


Рисунок 3.3 – Зависимости потерь от загрузки трансформатора:
а) – классический трансформатор, б) – ВТСП трансформатор

В номинальном режиме силового трансформатора традиционного исполнения резистивные потери в обмотках составляют приблизительно 75% от суммарных потерь, тогда как на долю потерь в магнитопроводе приходится около 25%. Для ВТСП-трансформатора характерна обратная пропорция: около 67% потерь сосредоточено в магнитной системе, в то время как сверхпроводящие обмотки не вносят вклада в тепловые потери. Это обеспечивает возможность работы с полной нагрузкой без снижения эффективности. Как показано на рисунке 3.4, КПД ВТСП трансформатора при 100 % загрузке составляет 99,9 %, что на 0,3–0,4 % превышает показатели традиционных трансформаторов сопоставимого класса напряжения и мощности.

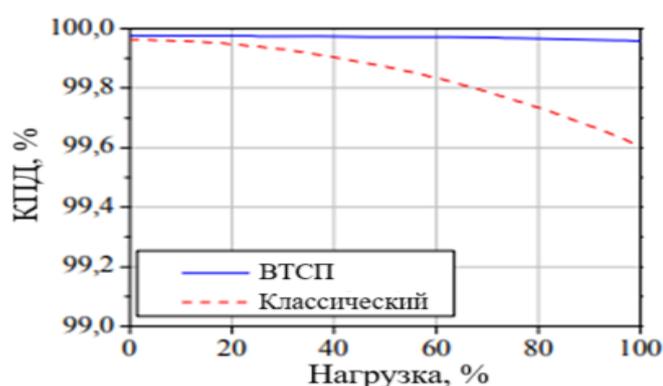


Рисунок 3.4 – Зависимость КПД от нагрузки для ВТСП и классического трансформаторов

На основании исследования характеристик потерь в ВТСП обмотках может быть установлен оптимальный диапазон напряжения короткого замыкания $U_{кз}$. Благодаря нулевым активным потерям в сверхпроводящих обмотках и независимости КПД от нагрузки, значение $U_{кз}$ может быть снижено до 0,5–2% в зависимости от номинальной мощности трансформатора и специфических параметров ВТСП-проводников.

3.2.3 Критические параметры высокотемпературных сверхпроводящих лент и токоограничивающая функция

Для обеспечения эффективной и бесперебойной работы ВТСП трансформатора с функцией ограничения тока КЗ следует учитывать критические параметры ВТСП ленты (ток, температура, магнитное поле), использованной в качестве материала обмоток.

Величина, возникающего в нормальном режиме магнитного поля не достигает критических значений, что исключает непредвиденную потерю сверхпроводимости, однако исследования, проведенные в [89, 90, 92], показали, что даже небольшие значения магнитных полей оказывают существенное влияние на величину критического тока сверхпроводящей обмотки (рис. 3.1). Исходя из вышесказанного, для обеспечения защиты трансформатора от непредвиденной потери сверхпроводящего состояния, следует задаться коэффициентом запаса тока $K_{з.т.}$, который будет определять номинальный ток ВТСП трансформатора

$$I_{Ном.} = I_c(T) \cdot K_{з.т.} \quad (3.7)$$

Выбор коэффициента запаса должен определяться условиями эксплуатации ВТСП трансформатора в режимах перегрузки. Современные ВТСП ленты второго поколения характеризуются значениями критического тока в диапазоне 139–600 А (в собственном магнитном поле при температуре 77 К). Для обеспечения устойчивой работы трансформатора при перегрузках до 90% рекомендуется применять коэффициент запаса в пределах 0,4 – 0,8, конкретное

значение которого зависит от электрофизических параметров ВТСП лент, используемых в обмотках.

Критическая температура ВТСП лент второго поколения, используемых в качестве материала для обмоток трансформатора, составляет 93 К. В момент ограничения аварийного тока КЗ, на обмотках происходит значительное выделение тепла, спровоцированное протеканием больших токов. После устранения КЗ, обмотка начинает охлаждаться.

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования показали, что максимальная эффективность теплоотвода достигается при перепаде температур между поверхностью обмотки и криогенной средой (жидкий азот), не превышающем 30 К (рисунок 2.15). Превышение данного температурного порога инициирует переход к режиму пленочного кипения жидкого азота, характеризующемуся минимальным коэффициентом теплопередачи (рисунок 2.15) [95]. Возникновение такого режима может привести к тепловому срыву сверхпроводящего состояния, для прекращения которого требуется принудительное отключение трансформатора. В связи с этим, температура обмоток не должна превышать точку кризиса кипения жидкого азота (102 К).

Возврат сверхпроводящего состояния возможен при условии, что количество тепловой энергии, выделившееся в обмотках в режиме токоограничения, не превышает критического значения $Q_{кр}$. Критическое значение тепловой энергии функционально зависит от отношения рабочего тока к номинальному току, а также от отношения рабочего тока к току короткого замыкания (рисунок 3.5) [96, 97].

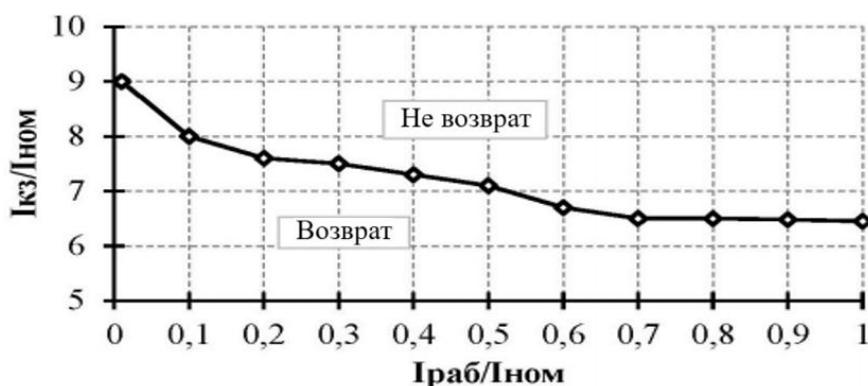


Рисунок 3.5 – Граница возврата обмотки в сверхпроводящее состояние

3.3 Matlab/Simulink модель трехфазной сети с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором

В главе 2 была экспериментально с помощью разработанного прототипа ВТСП трансформатора доказана возможность эффективного ограничения токов короткого замыкания в однофазной сети. Важным вопросом исследования является определение зависимости показателя токоограничения от типа короткого замыкания и характера нагрузки, подключенной к ВТСП трансформатору.

Для решения этой задачи, необходимо адаптировать разработанную математическую модель под трехфазную систему и смоделировать переходные процессы, возникающие в трехфазной электрической сети с ВТСП трансформатором при КЗ. Также важной задачей является определение параметров, влияющих на эффективность ограничения тока КЗ и возврат сверхпроводящего состояния обмоток трансформатора после ограничения тока КЗ за цикл АПВ и обеспечения дальнейшей безопасной работы всей системы в нормальном режиме.

Для решения поставленных выше задач, используя разработанную модель переходных процессов, проведено моделирование двух видов коротких замыканий (трехфазного, двухфазного) в электрической сети 10/0,4 кВ (рисунок 3.6) с трансформатором традиционного исполнения марки ТМГ21-1000/10/0,4 и ВТСП трансформатором.

Схема рассматриваемой электрической сети (рисунок 3.6) состоит из: питающей системы с номинальным напряжением $U_{ном} = 10$ кВ, кабельной линии ААБл-10-3х95 длиной $l=1$ км с погонными сопротивлениями $R_0 = 0,326$ Ом/км, $X_0 = 0,083$ Ом/км, трансформатора ТМГ21-1000/10/0,4 или ВТСП трансформатора. Примем мощность нагрузки $P_n = 767$ кВт, $Q_n = 642$ кВт, мощность короткого замыкания $S_{кз} = 210$ МВА, угловая частота сети $\omega = 314$ с⁻¹.

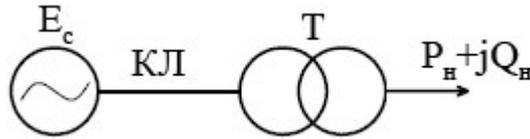


Рисунок 3.6 – Схема электрической сети 10/0,4 кВ

На рисунке 3.7 представлена схема замещения электрической сети.

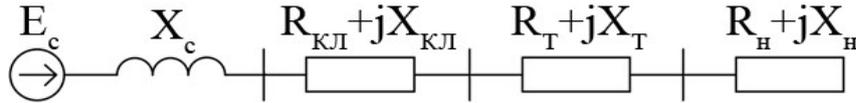


Рисунок 3.7 – Схема замещения электрической сети 10/0,4 кВ

В таблице 3.1 представлены основные параметры трансформатора ТМГ21-1000/10/0,4:

Таблица 3.1 - Параметры трансформатора ТМГ21-1000/10/0,4

| Тип | $U_{ВН}$, кВ | $U_{НН}$, кВ | $S_{НОМ}$, кВА | ΔP_{XX} , кВт | $\Delta P_{КЗ}$, кВт | $U_{КЗ}$, % |
|-----|---------------|---------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| ТМГ | 10 | 0,4 | 1000 | 1,3 | 11,6 | 5,5 |

Эквивалентное сопротивление системы X_C определяется, исходя из известной мощности КЗ питающей системы:

$$X_C = \frac{U_{НОМ}^2}{S_{КЗ}} = \frac{10^2}{210} = 0,476 \text{ Ом.}$$

Тогда индуктивность питающей системы:

$$L_C = \frac{X_C}{\omega} = \frac{0,476}{314} \cdot 1000 = 1,516 \text{ мГн.}$$

Активное сопротивление и индуктивность кабельной линии найдем по следующим выражениям:

$$R_{КЛ} = R_0 \cdot l_{КЛ} = 0,326 \cdot 1 = 0,326 \text{ Ом,}$$

$$L_{КЛ} = \frac{X_0}{\omega} \cdot l_{КЛ} = \frac{0,083}{314} \cdot 1 = 0,264 \text{ мГн.}$$

Вычислим активное сопротивление и индуктивность нагрузки:

$$R_H = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{P_H} = \frac{10^2}{767 \cdot 1000} = 130,38 \text{ Ом},$$

$$L_H = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Q_H \cdot \omega} = \frac{10^2}{642 \cdot 314} = 496,058 \text{ мГн.}$$

Активное сопротивление классического трансформатора определим через потери короткого замыкания:

$$R_T = \frac{\Delta P_{\text{КЗ}} \cdot U_{\text{ВННОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2} = \frac{11,6 \cdot 10^3 \cdot 10^2}{1000^2} = 1,16 \text{ Ом.}$$

Индуктивность обмоток вычислим, используя напряжение короткого замыкания трансформатора:

$$L_T = \frac{U_{\text{к\%}} \cdot U_{\text{ВННОМ}}^2}{100 \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \omega} = \frac{5,5 \cdot 10^2}{100 \cdot 1 \cdot 314} = 17,5 \text{ мГн.}$$

Для корректного моделирования эффекта токоограничения во время переходного процесса, необходимо определить длину ВТСП лент, используемых в качестве материала для обмоток. Приблизительно определим основные размеры и параметры активной части ВТСП трансформатора: мощность 1 МВА, соотношение напряжений 10/0,4 кВ, группа соединения обмоток – Y/Y_н-0.

Произведем расчет токов обмоток ВН и НН при соединении обмоток в звезду. Ток в фазах равен:

$$I_{\text{ВН.л}} = I_{\text{ВН.ф}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 57,4 \text{ А},$$

$$I_{\text{НН.л}} = I_{\text{НН.ф}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 1436,7 \text{ А.}$$

Принимая во внимание изложенные в предыдущем разделе принципы расчета ВТСП трансформаторов, примем рабочую индукцию стержня $B = 1,6$ Тл. Диаметр стержня магнитопровода определим по [63] $d = 0,24$, коэффициент заполнения ступенчатой фигуры сталью для магнитопровода выбранного диаметра будет равен $k_s = 0,92$ [63]. Рассчитаем активное сечение стержня:

$$P_C = \frac{k_{кр} \cdot \pi d^2}{4} = \frac{0,92 \cdot \pi \cdot 0,24^2}{4} = 0,042 \text{ м}^2.$$

Найдем ЭДС, приходящуюся на один виток обмотки:

$$E_B = 4,44 \cdot f \cdot B_C \cdot P_C = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot 0,042 = 12,4 \text{ В}$$

Тогда число витков обмоток ВН и НН соответственно:

$$W_{ВН} = \frac{U_{ВН\text{фаз.}}}{E_B} = \frac{5747}{12,4} = 463,5 \approx 464$$

$$W_{НН} = \frac{U_{НН\text{фаз.}}}{E_B} = \frac{230}{12,4} = 18,4 \approx 19$$

Теоретические и экспериментальные исследования в [59] показали, что рабочая плотность тока для ВТСП лент производства «СуперОкс» составляет $j = 150 \text{ А/мм}^2$. Рассчитаем ориентировочные сечения одного витка для обмоток ВН и НН:

$$P_{ВН} = \frac{I_{ВН\text{фаз.}}}{j} = \frac{57,4}{150} = 0,382 \text{ мм}^2,$$

$$P_{НН} = \frac{I_{НН\text{фаз.}}}{j} = \frac{1436,7}{150} = 9,57 \text{ мм}^2.$$

Для ВТСП лент толщиной 12 мм поперечное сечение равно $1,44 \text{ мм}^2$, для лент толщиной 4 мм сечение провода равно $0,48 \text{ мм}^2$. Таким образом для обмотки ВН оптимальным материалом будет ВТСП лента толщиной 4 мм с 1 проводником в витке. Для обмотки НН оптимальной является ВТСП лента толщиной 12 мм с числом параллельных проводников в витке = 7.

Однако, следует отметить, что на сегодняшний день выбор сверхпроводников весьма ограничен, поэтому следует выбирать сечение проводника не только по плотности, но и по критическому току, отстраиваясь таким образом от непредвиденной потери сверхпроводимости в номинальном режиме работы трансформатора и учитывая воздействие магнитного поля в трансформаторе на сверхпроводник.

Критический ток ВТСП лент производства «СуперОкс» в собственном магнитном поле равен: $I_{к4} = 149 \text{ А}$ для лент толщиной 4 мм и $I_{к12} = 589 \text{ А}$ для

лент толщиной 12 мм. Таким образом, критический ток выбранных ВТСП лент с учетом коэффициента запаса 0,4 будет равен:

$$I_{кВН} = I_{к4} \cdot K_{зап} = 0,4 \cdot 149 = 60 \text{ А},$$

$$I_{кНН} = I_{к12} \cdot K_{зап} = 0,4 \cdot 589 = 235,6 \text{ А}.$$

Амплитудное значение фазного тока обмотки ВН и НН:

$$I_{ВН.ф.макс} = I_{ВН.ф} \cdot \sqrt{2} = 57,4 \cdot \sqrt{2} = 81,17 \text{ А},$$

$$I_{НН.ф.макс} = I_{НН.ф} \cdot \sqrt{2} = 1436,7 \cdot \sqrt{2} = 2031 \text{ А}.$$

Необходимое количество параллельно идущих в витке элементарных проводников (лент) для обеспечения условия отстройки от критического тока ВСТП лент обмоток ВН и НН найдем по формуле:

$$n_{ВН.эл} = \frac{I_{ВН.ф.макс}}{I_{кВН}} = \frac{81,17}{60} = 1,35 \approx 2,$$

$$n_{НН.эл} = \frac{I_{НН.ф.макс}}{I_{кНН}} = \frac{2031}{235,6} = 8,62 \approx 9.$$

Таким образом выбирается наибольшее количество параллельных проводов в витке обмоток по условию отстройки от критического тока: для обмотки ВН – 2, для обмотки НН – 9.

Высота одного витка обмотки ВН с учетом изоляции составляет $h_{вит.ВН} = 6$ мм. Округлим число витков в обмотке ВН до 464 и предположим, что число слоев обмотки равно $n_{сл.ВН} = 8$. Тогда в одном слое будет $W_{сл.ВН} = 58$ витков, высота обмотки составит:

$$h_{ВН} = W_{сл.ВН} \cdot h_{вит.ВН} = 58 \cdot 6 = 348 \text{ мм}.$$

Высота одного витка обмотки НН с учетом изоляции составляет $h_{вит.НН} = 14$ мм. Округлим число витков в обмотке НН до 19 и предположим, что число слоев обмотки равно $n_{сл.НН} = 1$. Тогда в одном слое будет $W_{сл.НН} = 19$ витков, высота обмотки составит:

$$h_{НН} = W_{сл.НН} \cdot h_{вит.НН} = 19 \cdot 14 = 266 \text{ мм}.$$

Толщина обмотки ВН:

$$b_{BH} = b_{вит. BH} \cdot n_{сл. BH} = 2 \cdot 8 = 16 \text{ мм},$$

где $b_{вит. BH} = n_{BH.эл} \cdot (b_{лента} + b_{изоляция}) = 2 \cdot 1 = 2 \text{ мм}$ – толщина витка обмотки ВН.

Толщина обмотки НН:

$$b_{HH} = b_{вит. HH} \cdot n_{сл. HH} = 9 \cdot 1 = 9 \text{ мм},$$

где $b_{вит. HH} = n_{HH.эл} \cdot (b_{лента} + b_{изоляция}) = 9 \cdot 1 = 9 \text{ мм}$ – толщина витка обмотки НН.

Предположим, что толщина стенки криостата составляет 60 мм. Средняя длина витка обмотки ВН:

$$l_{ср. BH} = 2\pi \cdot (R_C + b_{крио} + b_{BH} / 2) = 2\pi \cdot (0,12 + 0,06 + 0,008) = 1,18 \text{ м},$$

где R_C - радиус стержня магнитопровода, $b_{крио}$ - толщина стенки криостата.

Средняя длина обмотки НН:

$$\begin{aligned} l_{ср. HH} &= 2\pi \cdot (R_C + b_{крио} + b_{BH} + \delta + b_{HH} / 2) = \\ &= 2\pi \cdot (0,12 + 0,06 + 0,016 + 0,03 + 0,0045) = 1,448 \text{ м} \end{aligned}$$

где $\delta = 0,03 \text{ м}$ - изоляционный промежуток между обмотками.

Длина провода в обмотке ВН с учетом параллельных проводников в витке:

$$L_{об. BH} = l_{ср. BH} \cdot W_{BH} \cdot n_{BH.эл} = 1,18 \cdot 464 \cdot 2 = 1270,4 \text{ м}.$$

Длина провода в обмотке НН с учетом параллельных проводников в витке:

$$L_{об. HH} = l_{ср. HH} \cdot W_{HH} \cdot n_{HH.эл} = 1,448 \cdot 19 \cdot 9 = 247,6 \text{ м}.$$

Найденные электрические и геометрические величины для ВТСП и классического трансформаторов используем для моделирования переходного процесса в исследуемой трехфазной сети (рисунок 3.8).

На рисунках 3.8 и 3.9 представлены Matlab/Simulink модели исследуемой сети с трансформатором марки ТМГ и ВТСП трансформатором соответственно. В качестве допущения было принято, что сопротивление в сверхпроводящем состоянии равно пренебрежимо малому значению 10^{-21} Ом .

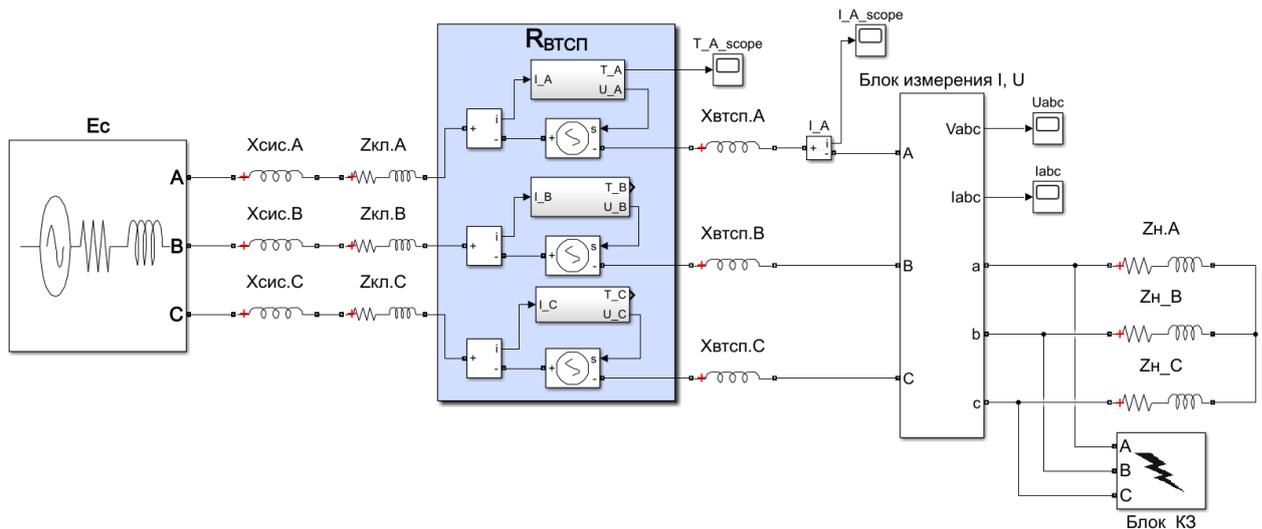


Рисунок 3.8 – MATLAB/Simulink модель исследуемой трехфазной сети с КЗ за ВТСП трансформатором

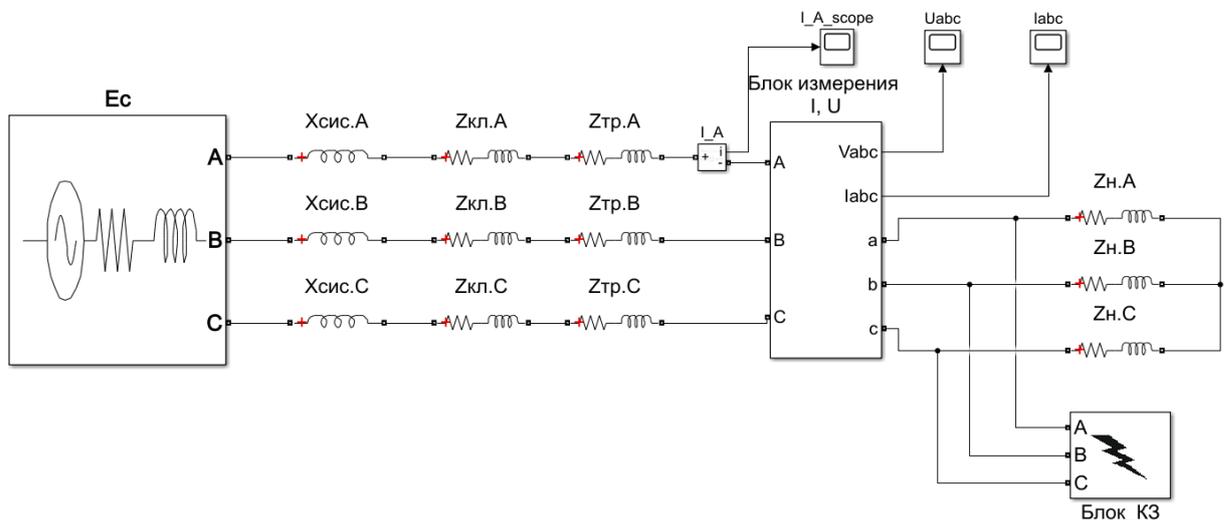


Рисунок 3.9 – MATLAB/Simulink модель исследуемой трехфазной сети с КЗ за трансформатором марки ТМГ21-1000/10/0,4

3.4 Исследование возможности ограничения ударных токов для различных типов короткого замыкания

Исследование возможности ограничения ударных токов КЗ выполнялось путем анализа процессов при различных видах короткого замыкания. Расчеты производились на основе разработанной и верифицированной модели сети с ВТСП трансформатором в ПВК MATLAB/Simulink.

3.4.1 Ограничение токов трехфазного короткого замыкания

Максимальное мгновенное значение тока КЗ называют ударным током, который возникает при наибольшей апериодической составляющей. Условиями, при которых возникает ударный ток являются: возникновение КЗ в момент перехода напряжения через ноль, до возникновения КЗ ток в электрической цепи носит емкостной характер или отсутствует. Ударный ток КЗ возникает, когда апериодическая и периодическая составляющие тока одного знака в момент времени, равном половине периода — 0,01 с. Разница в фазах и в значениях токов на момент КЗ максимальна при емкостном доаварийном токе. Учитывая, что емкостной нагрузочный ток не характерен для режимов электрических сетей, для расчета ударного тока КЗ используют второй по опасности режим — холостой ход. Таким образом, расчетные условия для определения ударного тока: доаварийный режим — холостой ход; возникновение КЗ при фазе напряжения ноль градусов.

На рисунках 3.10, 3.11 представлены результаты расчета процессов для сети с трансформатором марки ТМГ21-1000/10/0,4 и ВТСП трансформатором длительностью 0,8 с, 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.

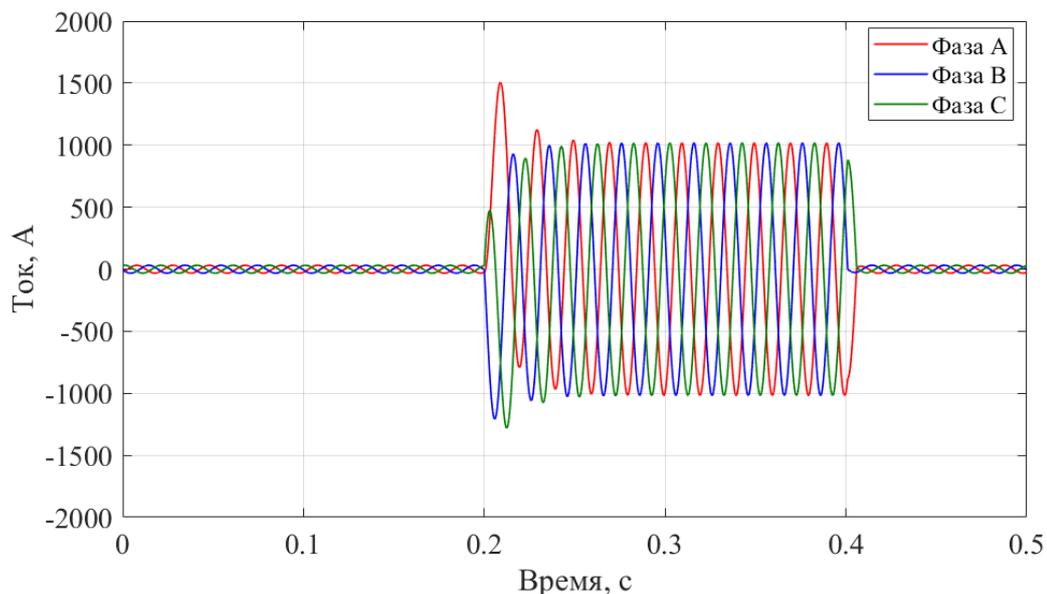


Рисунок 3.10 – Графики токов при $K^{(3)}$ в сети с ТМГ21-1000/10/0,4

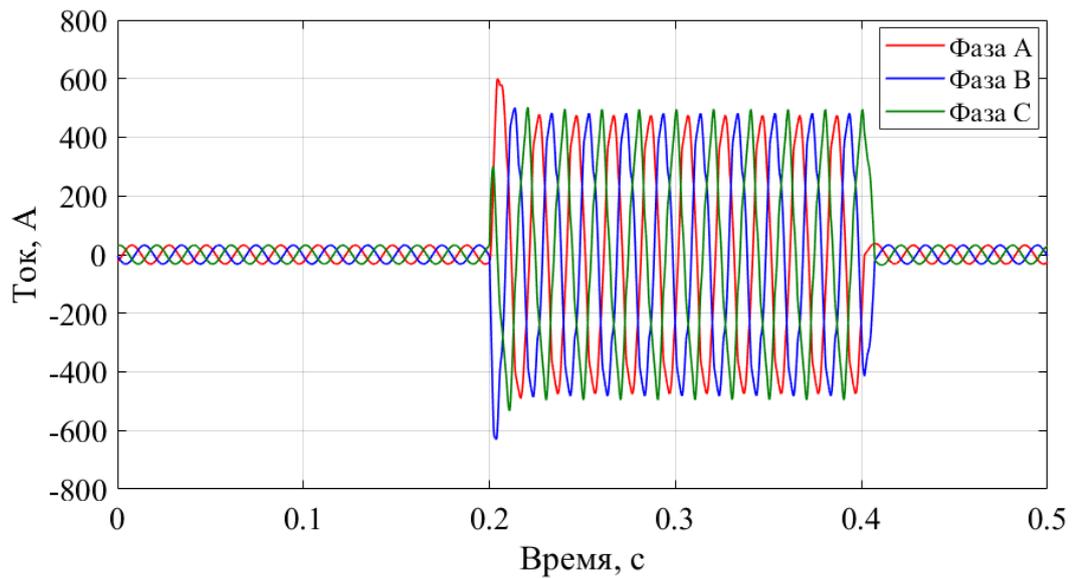


Рисунок 3.11 – Графики токов при $K^{(3)}$ в сети с ВТСП трансформатором

На рисунке 3.12 представлен график переходного процесса во время трёхфазного короткого замыкания в сети, показывающий способность ВТСП трансформатора ограничивать ударный ток короткого замыкания в сравнении с традиционным трансформатором. На рисунке 3.13 приведен процесс нагрева и охлаждения обмоток фазы А ВТСП трансформатора при ограничении тока трехфазного КЗ.

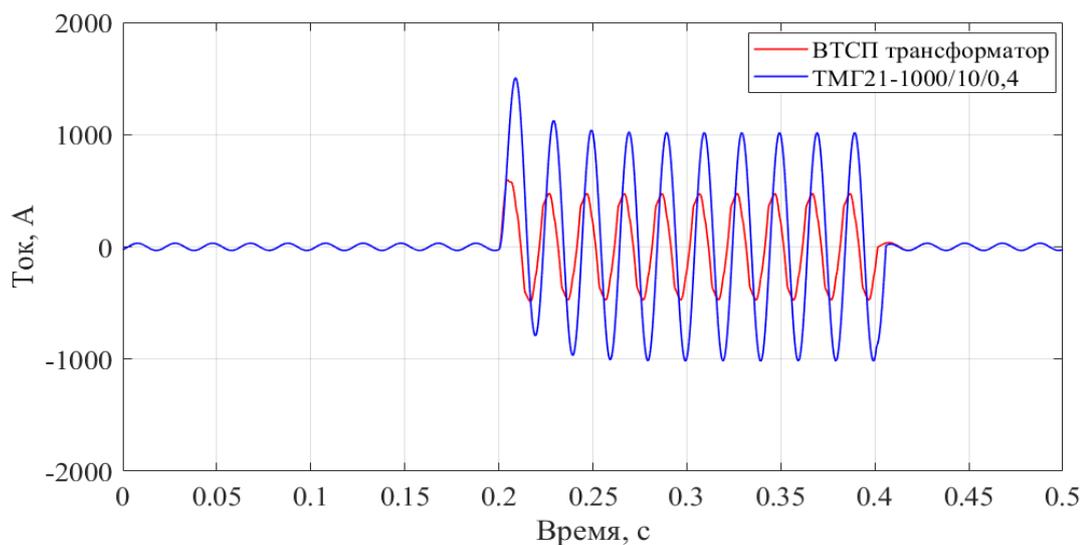


Рисунок 3.12 – Сравнение тока в фазе А при $K^{(3)}$ в сети с ВТСП трансформатором и ТМГ21-1000/10/0,4

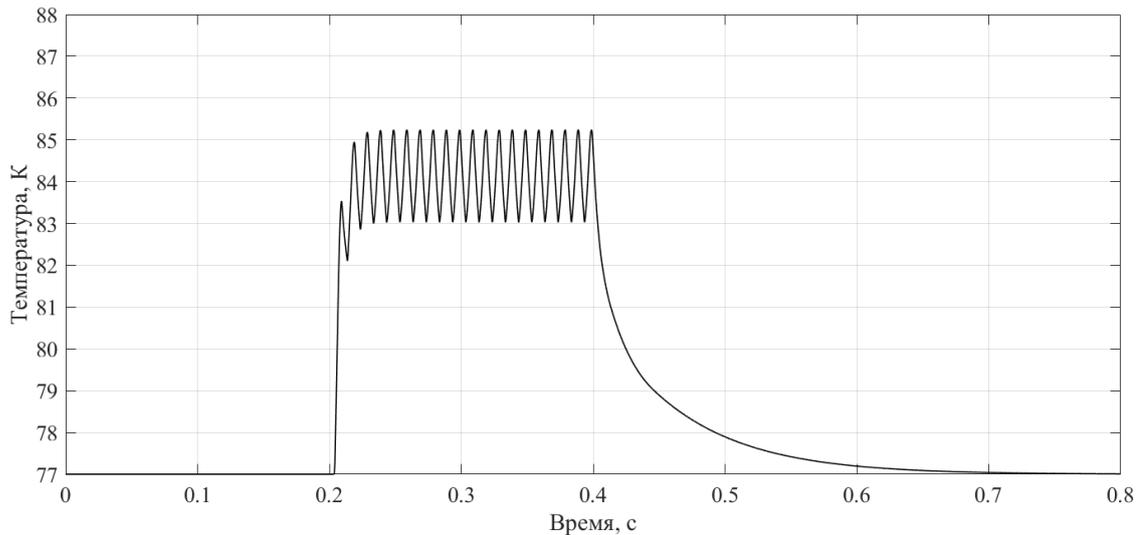


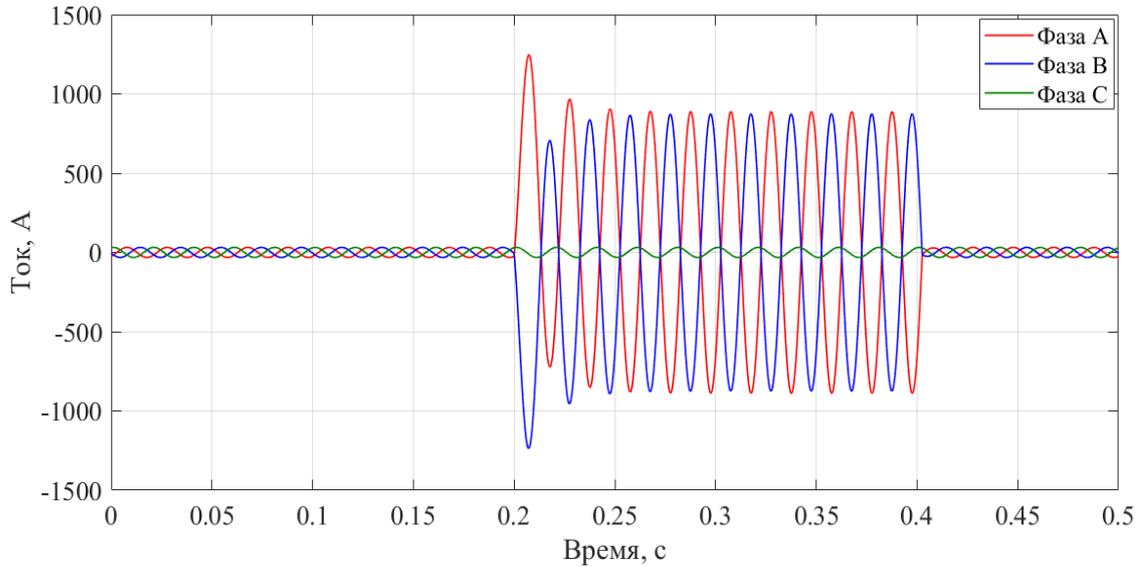
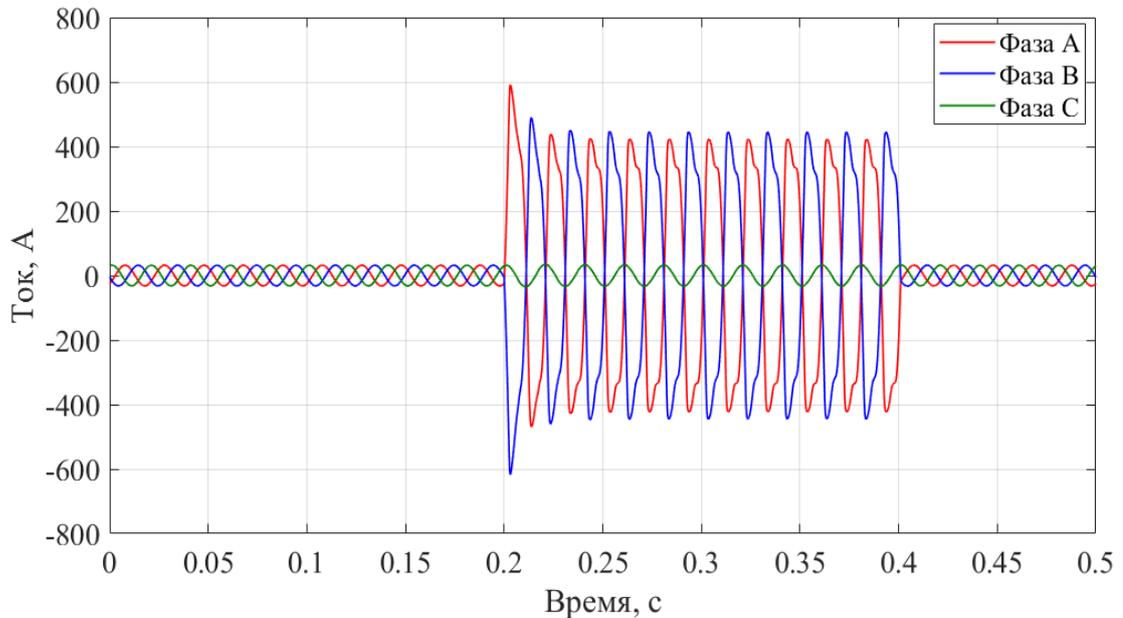
Рисунок 3.13 – Изменение температуры ВТСП обмоток фазы А при $K^{(3)}$

Из представленных процессов можно увидеть, что в случае трехфазного КЗ, ВТСП трансформатор ограничивает ударный ток КЗ в 2,5 раза. При этом нагрев обмоток не превышал температуру кризиса кипения жидкого азота (температура составила 85,2 К), что говорит об эффективном охлаждении обмоток и безопасном возврате ВТСП ленты в сверхпроводящее состояние после устранения КЗ.

Из графика на рисунке 3.12 также видно, что при превышении током критической величины сверхпроводящей ленты, ток в сети с ВТСП трансформатором смещен по фазе относительно тока, возникающего в сети с классическим трансформатором. Это объясняется возросшим активным сопротивлением ВТСП обмотки, которое превалирует над реактивным сопротивлением электрической цепи. Кроме того, апериодическая составляющая тока КЗ затухает быстрее, что также приводит к снижению ударного тока.

3.4.2 Ограничение токов двухфазного короткого замыкания

Смоделировав двухфазное короткое замыкание ($K^{(2)}$) длительностью 0,2 с в ПВК MATLAB/Simulink, получим характер изменения токов во время переходного процесса для сети с традиционным (рисунок 3.14) и ВТСП (рисунок 3.15) трансформаторами.

Рисунок 3.14 – Графики токов при $K^{(2)}$ в сети с ТМГ21-1000/10/0,4Рисунок 3.15 – Графики токов при $K^{(2)}$ в сети с ВТСП трансформатором

На рисунке 3.16 изображен график переходного процесса во время двухфазного короткого замыкания в сети, показывающий способность ВТСП трансформатора ограничивать ток короткого замыкания в сравнении с традиционным трансформатором. На рисунке 3.17 показана осциллограмма изменения температуры обмоток фазы А ВТСП трансформатора при ограничении тока двухфазного КЗ.

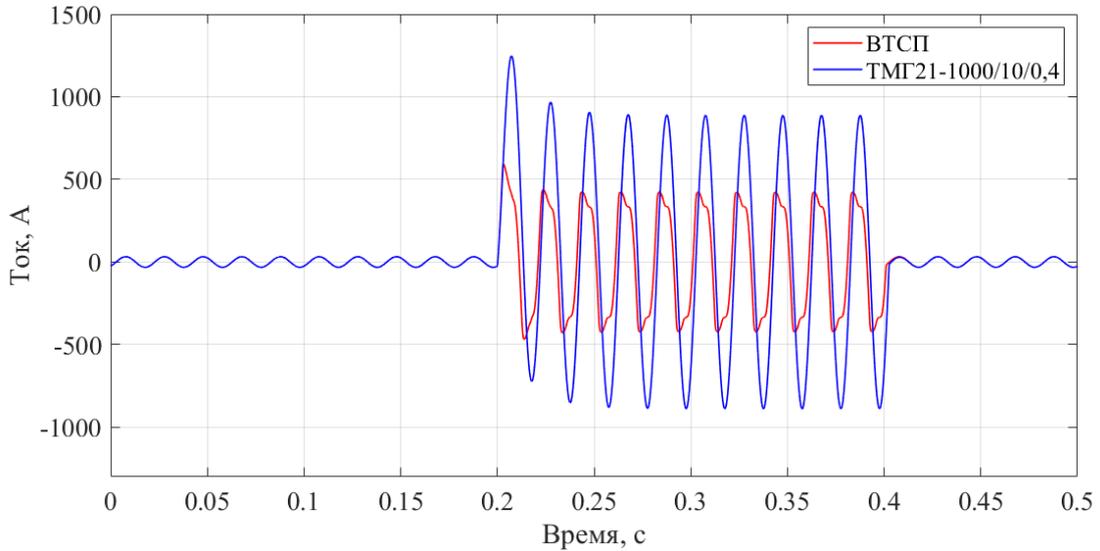


Рисунок 3.16 – Сравнение тока в фазе А при $K^{(2)}$ в сети с ВТСП трансформатором и ТМГ21-1000/10/0,4

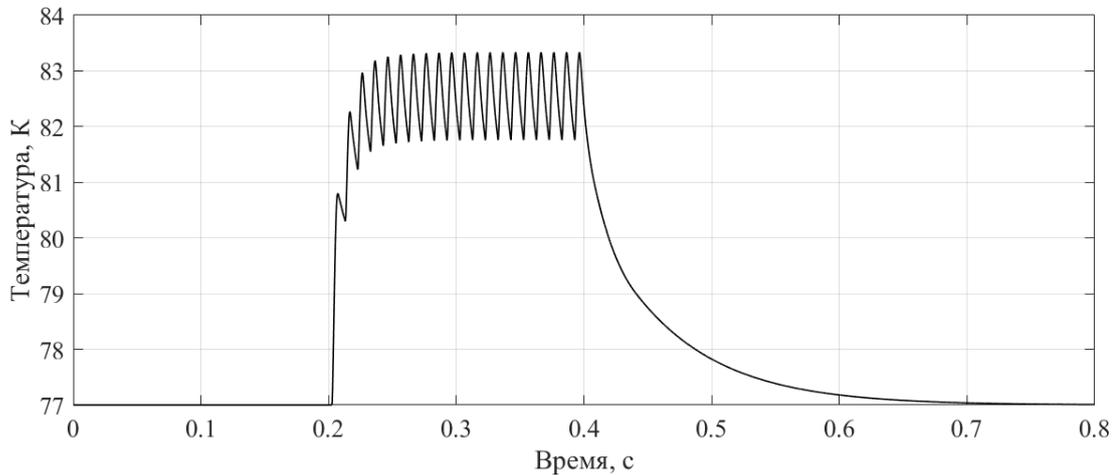


Рисунок 3.17 – Изменение температуры ВТСП обмоток фазы А при $K^{(2)}$

Анализ графиков показал, что ВТСП трансформатор способен ограничивать ударный ток двухфазного КЗ в 2,08 раза. При этом нагрев обмоток не превышает температуру кризиса кипения жидкого азота (температура составила 83,3 К), что говорит об эффективном охлаждении обмоток и безопасном возврате ВТСП ленты в сверхпроводящее состояние после устранения КЗ.

Анализ полученных результатов показал, что ВТСП трансформатор не только эффективно ограничивает ток КЗ, особенно ударный ток, но и возвращается в сверхпроводящее состояние достаточно быстро, всего за 0,2 с

после устранения КЗ, что делает возможным использовать АПВ в сети с ВТСП трансформаторами. При этом очевидно, что теплоемкость обмоток и криогенной жидкости должна быть рассчитана на поглощение выделяющейся тепловой энергии с учетом продолжительности КЗ. В случае невозможности восстановления сверхпроводящего состояния после ограничения тока КЗ, требуется отключение трансформатора для охлаждения и предотвращения термического разрушения обмоток.

В таблице 3.2 приведены значения ударных токов и максимальных температур обмоток для исследуемых видов КЗ в сети с ВТСП трансформатором и ТМГ21-1000/10/0,4.

Таблица 3.2 - Значения токов и температур при разных режимах КЗ в сети

| Вид КЗ | Ток КЗ в электрической сети с ТМГ21-1000/10/0,4, А | Ток КЗ в электрической сети с ВТСП трансформатором, А | Температура обмоток ВТСП трансформатора, К |
|------------|--|---|--|
| Трехфазное | 1500 | 611 | 85,2 |
| Двухфазное | 1267 | 606 | 83,3 |

Поскольку ток КЗ достигает примерно одинаковых значений, с разницей в 0,9 %, то можно сделать вывод, что токоограничивающая функция ВТСП трансформатора эффективна вне зависимости от вида короткого замыкания или характера подключенной нагрузки [67]. Для оценки эффективности токоограничивающей функции следует учитывать тепловые, критические и геометрические параметры используемых ВТСП лент и их материал, а также топологию и электрические параметры электрической сети, в которой планируется использовать ВТСП трансформатор. Особое внимание следует уделять возврату сверхпроводящего состояния, которое должно происходить после устранения КЗ достаточно быстро, не вызывая значительный перегрев и повреждения обмоток трансформатора.

3.5 Анализ влияния различных параметров на эффективность токоограничивающей функции высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора

Применение ВТСП трансформаторов с токоограничивающей функцией в электрических сетях предъявляет ряд требований к конструкции трансформатора, обусловленных особенностями существующих режимов энергосистемы [83, 98]. Важным вопросом исследования является определение уровня токоограничения в зависимости от показателя вольт-амперной характеристики, который может принимать различные значения в зависимости от материала и износа ВТСП ленты. Помимо этого, необходимо оценить степень влияния фазного угла питающего напряжения в момент КЗ на величину тока КЗ и количество выделяющегося тепла в обмотках. Также важной задачей является работа ВТСП трансформатора в цикле успешного АПВ, где в результате возникновения короткого замыкания и ограничения ударного тока за счёт возросшего сопротивления сверхпроводящих проводов происходит перегрев последних.

3.5.1 Исследование влияния показателя вольт-амперной характеристики высокотемпературной сверхпроводящей ленты на уровень ограничения тока короткого замыкания

Возврат рабочего сверхпроводящего состояния ВТСП ленты зависит от следующих параметров: длительности короткого замыкания, величины тока КЗ, критических параметров сверхпроводника, длительности бестоковой паузы, материала и геометрических параметров используемой ВТСП ленты. При этом на эффективность и уровень ограничения тока КЗ, особенно ударного тока, основное влияние оказывают показатель критического тока $I_K(B, \theta)$ и показатель степени нелинейности вольт-амперной характеристики $n(B, \theta)$ ВТСП ленты. Оба параметра имеют зависимость от величины магнитного поля, в котором находится сверхпроводник и ориентации воздействия этого поля относительно

плоскости ВТСП ленты. Другими словами, уровень ограничения тока КЗ будет меняться в зависимости от величины показателя степени ВАХ и изменения критического тока сверхпроводника при сохраняющихся параметрах электрической сети и длительности короткого замыкания.

Поскольку величина критической плотности тока и показателя ВАХ может меняться не только под воздействием внешних полей, но и в связи с механическими и термическими воздействиями на сверхпроводник, необходимо оценить влияние этих параметров на уровень ограничения тока КЗ и величину перегрева обмоток ВТСП трансформатора.

Объектом исследования выбрана электрическая сеть из предыдущего раздела (рисунок 3.8), в которой происходит трехфазное короткое замыкание. В ходе экспериментов рассчитывались токи и температура при варьировании показателя степени ВАХ и критического тока ВТСП ленты. В качестве допущения принималось постоянство показателя нелинейности ВАХ и критического тока по всей длине обмотки трансформатора.

На рисунке 3.18 показаны графики тока в фазе А при КЗ за ВТСП трансформатором с диапазоном варьирования n равным $15 \div 35$, с шагом 5. Данный диапазон выбран на основе экспериментов, проведенных для ВТСП лент производства «СуперОкс» [58].

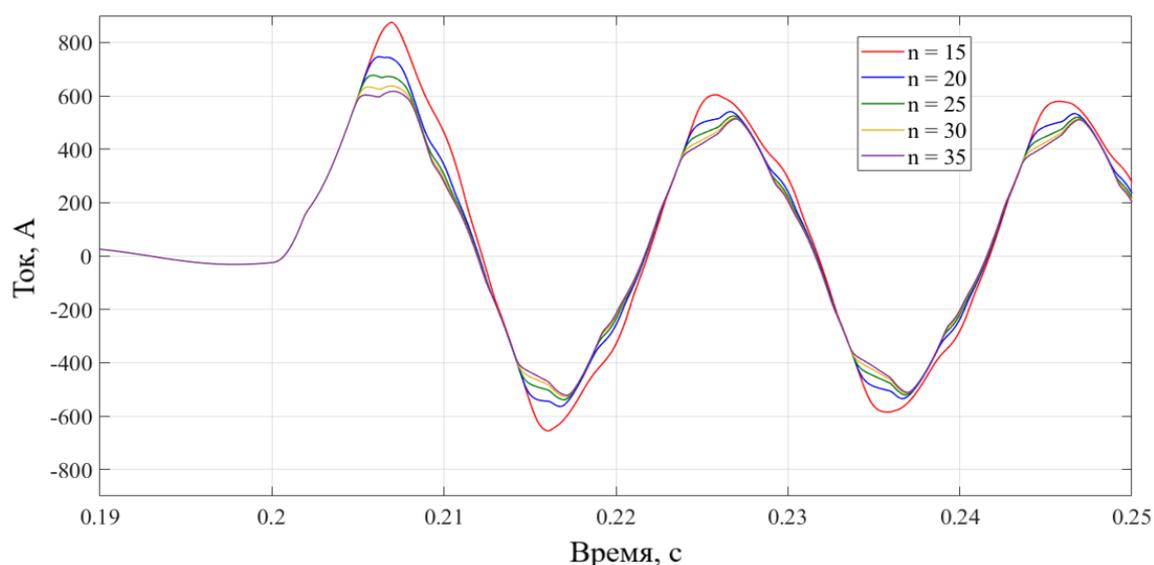


Рисунок 3.18 – Графики ограниченного тока трехфазного КЗ в зависимости от показателя степени ВАХ

На рисунках 3.19 и 3.20 представлены полученные в ходе моделирования зависимости температуры обмоток фазы А и величины токоограничения от показателя степени ВАХ. Величина токоограничения при этом рассчитывалась как:

$$K_{огр.} = \frac{I_{КЗуд.ТМГ}}{I_{КЗуд.ВТСП}}, \quad (3.8)$$

где $I_{КЗуд.ТМГ}$ - ударный ток КЗ в сети с трансформатором марки ТМГ21-1000/10/0,4, А; $I_{КЗуд.ВТСП}$ - ударный ток КЗ в сети с ВТСП трансформатором, А.

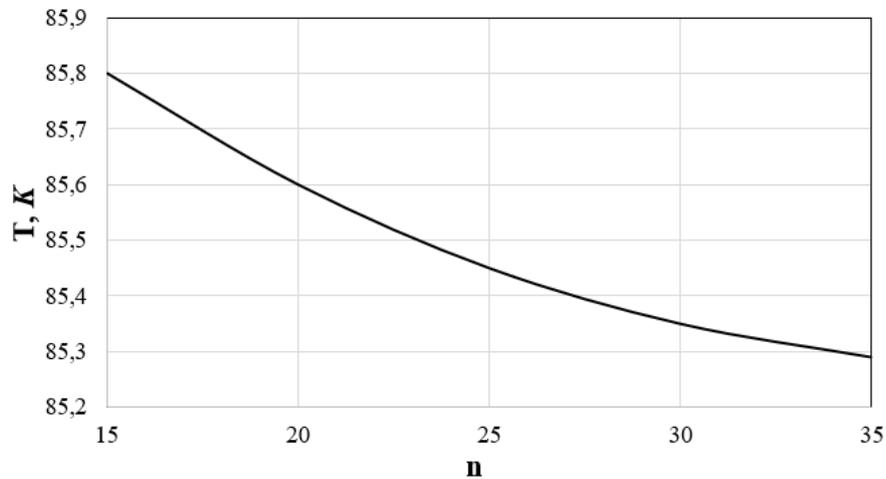


Рисунок 3.19 – Зависимость максимальной температуры нагрева от показателя степени ВАХ

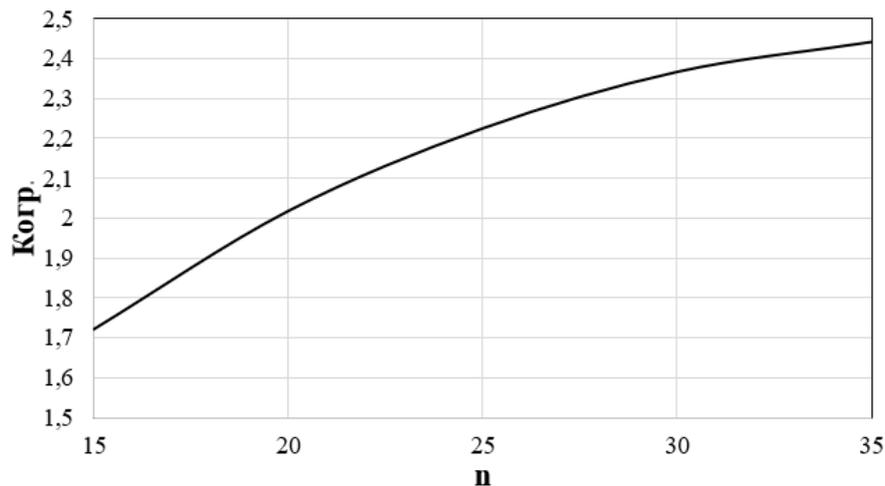


Рисунок 3.20 – Зависимость уровня ограничения тока от показателя степени ВАХ

Анализ полученных зависимостей показал, что эффективность токоограничивающей функции существенно зависит от показателя степени ВАХ

сверхпроводящей ленты. Влияние на нагрев ВСПП провода оказалось несущественно, 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.

На рисунке 3.21 представлены графики токов в фазе А при трехфазном КЗ за трансформатором для двух случаев критического тока. Исследования показали, что при снижении критического тока ВСПП 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.

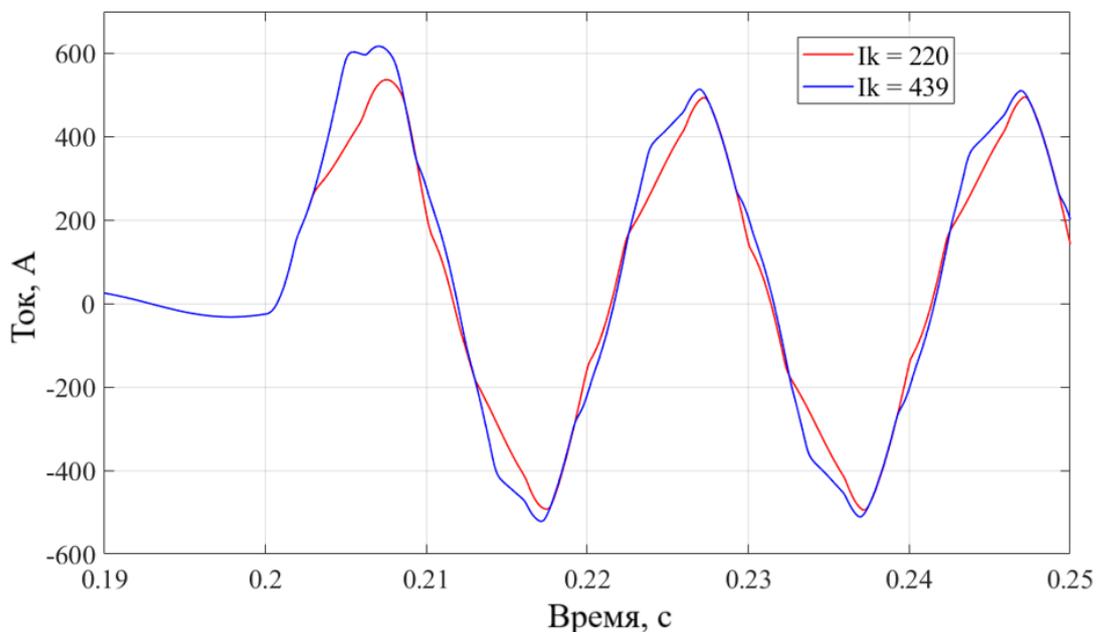


Рисунок 3.21 - Графики тока трехфазного КЗ в режиме ограничения в зависимости от критического тока ВСПП ленты

3.5.2 Автоматическое повторное включение в электрической сети класса напряжения 10 кВ с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором

В качестве объекта моделирования рассмотрим электрическую сеть 35/10 кВ (рисунок 3.22), состоящую из питающей системы 35 кВ, ВТСП трансформатора мощностью 2500 кВА, воздушной линии АС-70/11 длиной 5 км. Примем мощность нагрузки - 2500 кВА, мощность короткого замыкания – 250 МВА. Рассчитанные сопротивления сведены в таблицу 3.3.

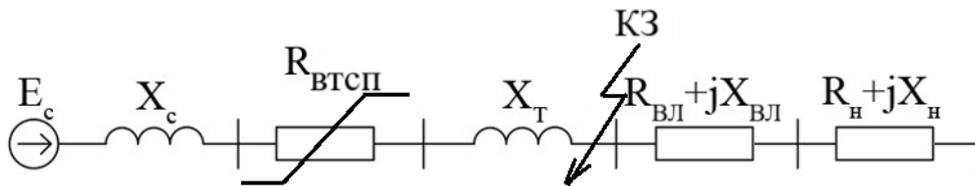


Рисунок 3.22 – Схема замещения моделируемой сети 35/10 кВ

Таблица 3.3 - Сопротивления элементов схемы замещения

| $X_c, \text{ Ом}$ | $X_T, \text{ Ом}$ | $R_{\text{вл}}, \text{ Ом}$ | $X_{\text{вл}}, \text{ Ом}$ | $Z_H, \text{ Ом}$ |
|-------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|
| 0,4 | 2,57 | 2,65 | 1,7 | 40 |

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

Смоделируем наиболее тяжелый режим отключения КЗ, при котором линия отключается только второй (резервной) ступенью МТЗ с максимальной выдержкой времени. Согласно [3, 99] время срабатывания ТО - 0,02 - 0,1 с, время срабатывания первой ступени МТЗ – 0,5 – 2 с, второй ступени МТЗ – на 0,5 с больше первой. Собственное время отключения вакуумного выключателя примем 0,05 с. Время бестоковой паузы цикла АПВ для сетей 6-10 кВ принимается 0,5-1,5 с.

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 (рисунок 3.23 а)) и температуры (рисунок 3.23 б)) в обмотках ВТСП трансформатора.

Из рисунка 3.23 б) видно, что в обмотке ВТСП трансформатора происходит резкое повышение температуры, 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 этом режиме разница температур между поверхностью ВТСП обмоток и криогенной жидкостью не превышает температуру кризиса кипения, жидкий азот находится в стадии пузырькового кипения и охлаждение происходит максимально эффективно. 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 является меньше величины минимальной бестоковой паузы цикла АПВ для электрических сетей 6-10 кВ.

Из полученных результатов следует, что рассчитанные для ограничения тока КЗ обмотки способны возвращаться в нормальный режим после устранения КЗ достаточно быстро, что говорит о возможности безопасного АПВ линий в сети при использовании ВТСП трансформатора с функцией ограничения тока. Также, возможно увеличить скорость охлаждения обмоток, применяя дополнительную циркуляцию криогенной жидкости. Это мероприятие позволит гарантированно сохранять систему охлаждения в стадии пузырькового кипения.

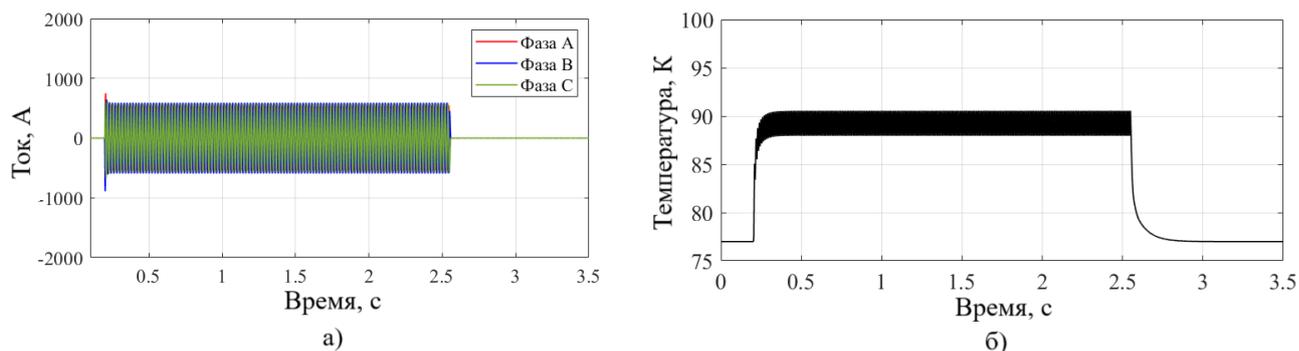


Рисунок 3.23 – Графики:

а) тока в электрической сети, б) температуры в обмотке ВТСП трансформатора

На рисунке 3.24 представлена зависимость отношения ударного тока трехфазного КЗ к номинальному току трансформатора от времени бестоковой паузы после устранения КЗ. Установлено, что в условиях эксперимента кратность тока КЗ к номинальному не должна превышать 41, поскольку именно в этом диапазоне наблюдается стабилизация температуры обмоток в диапазоне до 100 К (рисунок 3.23 б)). Из представленной кривой изменения температуры видно, что после отключения КЗ при тепловой стабилизации температуры обмоток в диапазоне, не превышающем температуру кризиса кипения жидкого азота, происходит быстрый возврат сверхпроводящего состояния обмоток за время бестоковой паузы от 0,4 с.

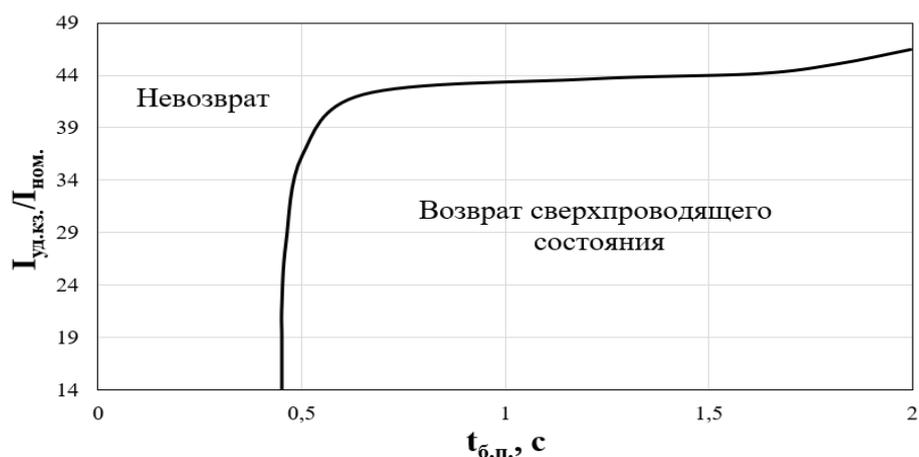


Рисунок 3.24 – Зависимость кратности тока КЗ к номинальному току от времени бестоковой паузы

Полученная зависимость (рисунок 3.24) показывает, что при величине кратности тока КЗ к номинальному более 46,5, ВТСП обмотки не успевают

вернуть сверхпроводящее состояние за время бестоковой паузы 2 с. Включение неостывшего за время бестоковой паузы ВТСП трансформатора под нагрузку, способно повредить несверхпроводящие слои ВТСП ленты и нарушить целостность обмоток из-за их перегрева и длительного нахождения в резистивном состоянии.

Полученная зависимость позволяет определять допустимую длительность КЗ, при которой в ВТСП трансформаторе наблюдается нарушение тепловой устойчивости обмоток и невозврат сверхпроводящего состояния трансформатора при успешном АПВ. Такую зависимость можно получить для ВТСП трансформаторов любой мощности, что позволяет определять недопустимую длительность КЗ и выбирать оптимальную длительность бестоковой паузы при АПВ, с точки зрения возврата сверхпроводящего состояния ВТСП обмоток.

3.6 Анализ эффективности ограничения тока короткого замыкания при использовании высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора с расщепленной обмоткой

Для исследования целесообразности и эффективности расщепления обмоток низкого напряжения ВТСП трансформатора проведем сравнительный анализ использования на подстанции сверхпроводящего и классического трансформаторов с расщепленными обмотками низкого напряжения. На рисунке 3.25 представлена принципиальная схема исследуемой сети, на рисунке 3.26 схемы замещения для расчета тока трехфазного короткого замыкания.

Параметры приведенных трансформаторов и системы:

Система: $U_C = 115$ кВ, $R_C = 1$ Ом, $X_C = 8$ Ом.

Трансформатор марки ТРДН-40000/110: $S_{ном} = 40$ МВА, $U_{BH} = 115$ кВ, $U_{HH} = 11$ кВ, $u_{kB-H} = 10,5$ %, $u_{кН-H} = 38$ %, $\Delta P_{кз} = 170$ кВт.

ВТСП трансформатор: $S_{ном} = 40$ МВА, $U_{BH} = 115$ кВ, $U_{HH} = 11$ кВ,
 $u_k = 3$ %.

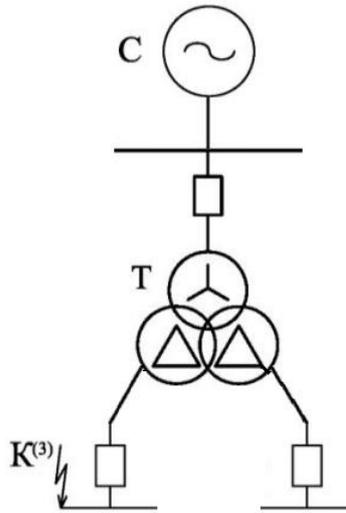


Рисунок 3.25 – Принципиальная схема для расчета тока КЗ

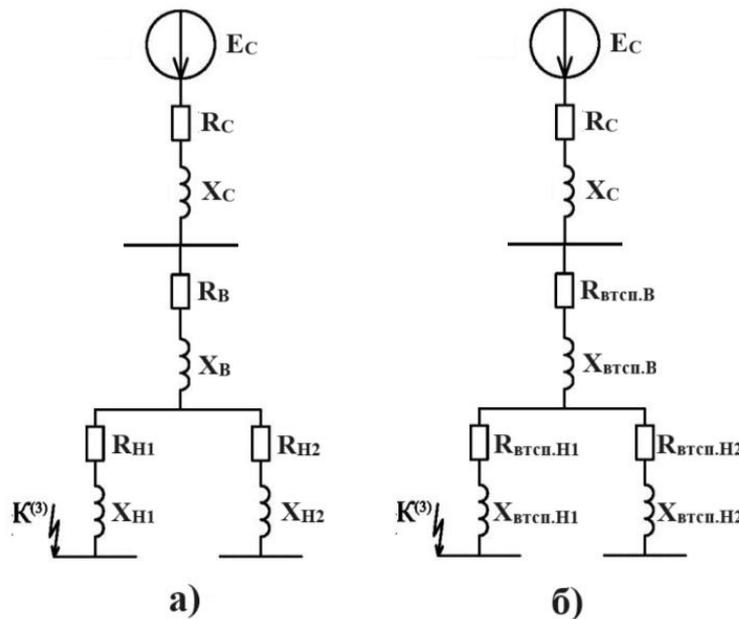


Рисунок 3.26 – Схема замещения для расчета тока КЗ в сети:
а) с трансформатором ТРДН-40000/110, б) с ВТСП трансформатором

Рассчитаем активные сопротивления обмоток ТРДН-40000/110:

$$R_B = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{кз} \cdot U_{ном}^2}{1000 \cdot S_{ном}^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{170 \cdot 115^2}{1000 \cdot 40^2} = 0,7 \text{ Ом},$$

$$R_{H1} = R_{H2} = 2 \cdot R_B = 0,7 \cdot 2 = 1,4 \text{ Ом}.$$

Коэффициент расщепления:

$$K_p = \frac{U_{\kappa H-H}}{U_{\kappa B-H}} = \frac{38}{10,5} = 3,62.$$

Рассчитаем полные сопротивления обмоток трансформатора:

$$Z_{B-H} = \frac{U_{\kappa B-H}}{100} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{115^2}{40} = 34,71 \text{ Ом},$$

$$Z_B = Z_{B-H} \cdot \left(1 - \frac{K_p}{4}\right) = 34,71 \cdot \left(1 - \frac{3,62}{4}\right) = 3,29 \text{ Ом},$$

$$Z_{H1} = Z_{H2} = Z_{B-H} \cdot \frac{K_p}{2} = 34,71 \cdot \frac{3,62}{2} = 62,82 \text{ Ом}.$$

Найдем индуктивные сопротивления обмоток трансформатора:

$$X_{H1} = X_{H2} = \sqrt{Z_{H1}^2 - R_{H1(H2)}^2} = \sqrt{62,82^2 - 1,4^2} = 62,8 \text{ Ом},$$

$$X_B = \sqrt{Z_B^2 - R_B^2} = \sqrt{3,29^2 - 0,7^2} = 3,21 \text{ Ом}.$$

При нахождении активных и индуктивных сопротивлений ВТСП трансформатора учтем, что в момент ограничения тока КЗ активное сопротивление обмоток резко возрастает. Активное сопротивление ВТСП трансформатора на высокой стороне после выхода обмоток из сверхпроводящего состояния, на основе исследований, проведенных в [69], принимается равным 11 Ом, тогда сопротивления низкой стороны равны 22 Ом. Для упрощения расчета примем индуктивные сопротивления такими же, как в трансформаторе марки ТРДН. Это допустимо, согласно [38] индуктивные сопротивления обмоток ВТСП трансформатора близки к сопротивлениям классических трансформаторов одинаковой мощности.

Проведем расчет тока короткого замыкания в сети с ВТСП трансформатором:

$$\begin{aligned} I_{КЗ.вмсп} &= \frac{U_C}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_C + R_{вмсп.В} + R_{вмсп.Н1})^2 + (X_C + X_{вмсп.В} + X_{вмсп.Н1})^2}} = \\ &= \frac{115}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(1+11+22)^2 + (8+3,21+62,8)^2}} = 0,79 \text{ кА} \end{aligned}$$

Ток короткого замыкания в случае использования в сети ТРДН-40000/110 с расщепленной обмоткой:

$$I_{КЗ.ТРДН} = \frac{U_C}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_C + R_B + R_{H1})^2 + (X_C + X_B + X_{H1})^2}} =$$

$$= \frac{115}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(1 + 0,7 + 1,4)^2 + (8 + 3,21 + 62,8)^2}} = 0,89 \text{ кА}$$

Проведенные исследования показали, что ВТСП трансформатор с расщепленной обмоткой ограничивает ток эффективнее на 12,6 %, что делает использование таких трансформаторов целесообразным для ограничения токов КЗ на стороне низкого напряжения.

Выводы по главе 3

1. Разработанная в ПВК Matlab/Simulink математическая модель позволяет выполнять расчет электромагнитных и тепловых переходных процессов в трехфазной сети с ВТСП трансформатором при варьировании видов КЗ.

2. ВТСП трансформатор способен эффективно ограничивать токи трехфазного и двухфазного КЗ, не допуская перегрев обмоток, при этом снижение ударного тока короткого замыкания происходит в 2,5 раза при трехфазном КЗ в сравнении с трансформатором марки ТМГ.

3. В экспериментах при варьировании показателя ВАХ ВТСП трансформатора в диапазоне $n = 15 \div 35$ получено, что при $n = 15$ уровень ограничения тока КЗ ниже на 29,4% по сравнению с $n = 35$, что является существенным при проектировании и эксплуатации ВТСП трансформаторов.

4. Основными факторами перегрева обмоток в режимах ограничения тока КЗ являются толщина стабилизирующего слоя ВТСП ленты, величины токов, длительность КЗ и время бестоковой паузы после отключения КЗ.

5. Расщепление обмоток низкого напряжения ВТСП трансформатора повышает эффективность ограничения тока КЗ на 12,6 % в сравнении с классическим трансформатором с расщепленной обмоткой.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОМАШИННОЙ СИСТЕМЕ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ

4.1 Постановка задачи

В предыдущих главах работы показано, что при ограничении тока КЗ, активное сопротивление обмоток ВТСП трансформатора может достигать значительных значений. Это явление может оказывать существенное влияние на электромеханические переходные процессы и динамическую устойчивость параллельной работы синхронных генераторов в составе энергосистем при коротких замыканиях. Кроме того, ставится задача совместного расчета электромеханического переходного процесса и анализа тепловых процессов, влияющих на возврат сверхпроводящего состояния ВТСП трансформатора после ограничения тока для выявления границ безопасных режимов для ВТСП трансформаторов.

Для решения поставленных задач проведены исследования взаимного влияния переходных электромеханических процессов в ЭЭС на тепловую устойчивость ВТСП обмоток и ВТСП трансформаторов на динамическую устойчивость режима ЭЭС с симуляцией процессов в среде Matlab/Simulink.

4.2 Качественный анализ влияния высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора на динамическую устойчивость

Проведем анализ влияния ВТСП трансформатора на динамическую устойчивость электростанции, выдающей мощность в приемную энергосистему большой мощности по двум воздушным линиям электропередачи напряжением 220 кВ, используя модель эквивалентной одномашинной ЭЭС генератор-трансформатор-линия-шины бесконечной мощности. Рассмотрим два варианта:

ЭЭС с трансформатором традиционного исполнения типа ТРДЦН-100000/220. Принципиальная схема и схема замещения исследуемой ЭЭС приведены на рисунке 4.1.

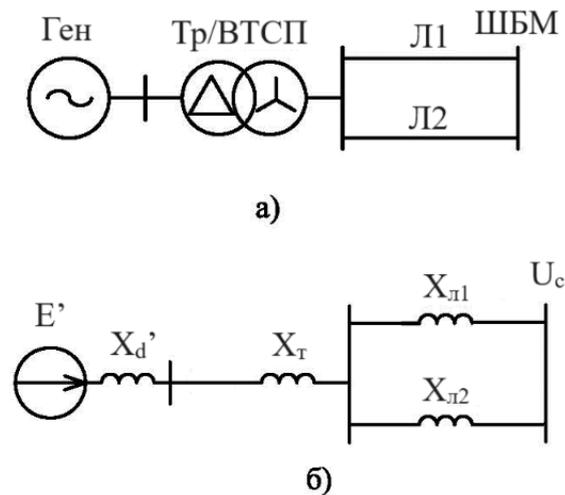


Рисунок 4.1 – Исследуемая система:
а) принципиальная схема; б) схема замещения

Рассмотрим одно из основных расчетных возмущений – трехфазное короткое замыкание в начале одной из отходящих от шин с трансформатором линий электропередачи. Анализ динамической устойчивости параллельной работы генератора в ЭЭС проведем методом площадей на основе угловых характеристик передаваемой мощности с учетом возникающего активного сопротивления ВТСП трансформатора при потере свойства сверхпроводимости в момент возникновения КЗ. Необходимые для расчета параметры элементов электрической сети представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры исследуемой ЭЭС

| | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------|-----------|
| Генератор ТВФ-120-2У | $S_{\text{ном}}$, МВА | $U_{\text{ном}}$, кВ | x_d'' , о.е. | x_d' , о.е. | x_d , о.е. | T_j , с |
| | 117,5 | 10,5 | 0,192 | 0,278 | 1,91 | 7,8 |
| Трансформатор ТРДЦН-100000/220 | $S_{\text{ном}}$, МВА | $U_{\text{вн}}$, кВ | $U_{\text{нн}}$, кВ | $P_{\text{кз}}$, кВт | $U_{\text{кз}}$, % | |
| | 100 | 230 | 11 | 340 | 12,5 | |
| ВТСП трансформатор | $S_{\text{ном}}$, МВА | $U_{\text{вн}}$, кВ | $U_{\text{нн}}$, кВ | $R_{\text{втсп}}$ при КЗ, Ом | | |
| | 100 | 230 | 11 | 25 | | |

| | | | |
|-------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| Линия | L, км | г _{уд} , Ом/км | х _{уд} , Ом/км |
| | 100 | 0,121 | 0,435 |
| ШБМ | U _с , кВ | х _с , Ом | |
| | 230 | 10 | |

На рисунке 4.2 представлены угловые характеристики мощности для нормального (P₁), аварийного (P₂) и послеаварийного (P₃) режимов для первого варианта (с обычным трансформатором).

Угловая характеристика генератора для нормального режима работы может быть найдена по выражению [100]:

$$P_G = \frac{E' \cdot U_C}{X'_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta, \quad (4.1)$$

где E' - постоянная ЭДС генератора, $X'_{d\Sigma}$ - суммарное индуктивное сопротивление, рассчитанное по схеме замещения для нормального режима (рисунок 4.3 а)), U_C - напряжение на ШБМ, δ - угол ротора генератора.

Замещение генератора с регулятором возбуждения пропорционального типа постоянной переходной ЭДС обычно принимается для аналитического исследования динамической устойчивости в простейшей ЭЭС [100].

При возникновении трехфазного КЗ на одной из линий электропередачи, схема замещения примет вид б) на рисунке 4.3. При этом генератор не выдает мощность в сеть, а ротор начинает ускоряться, вследствие чего увеличивается угол δ . После отключения аварийной линии генератор выдает мощность по одной работающей линии, при этом общее индуктивное сопротивление $X'_{d\Sigma}$ увеличивается в соответствии со схемой замещения (рисунок 4.3 в)), а выдача мощности происходит согласно послеаварийной угловой характеристике P₃.

Устойчивость системы в рассмотренном случае сохраняется при условии, что площадка торможения S_T будет больше, чем площадка ускорения S_Y (рисунок 4.2).

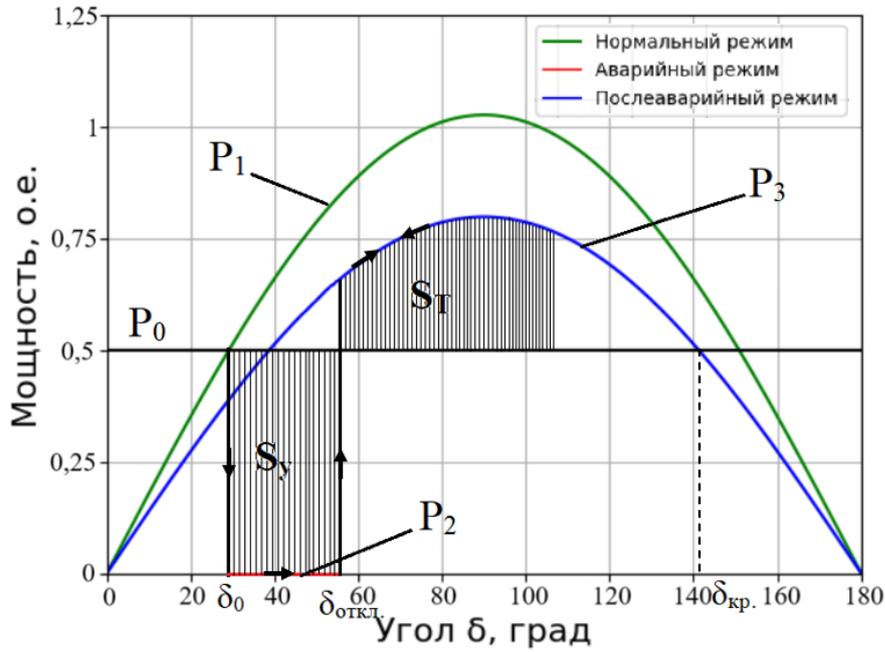


Рисунок 4.2 – Угловые характеристики мощности генератора в случае использования трансформатора ТРДЦН

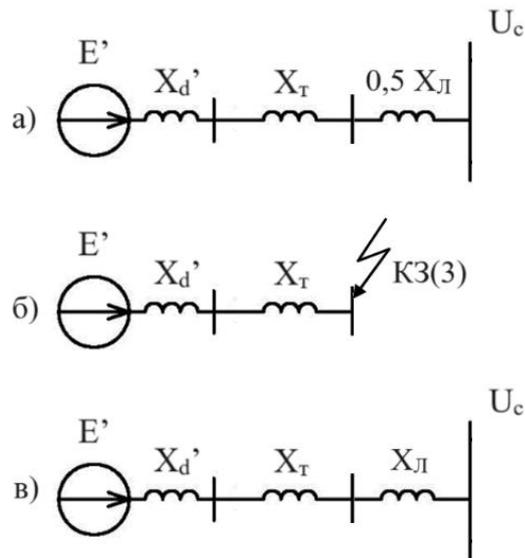


Рисунок 4.3 – Схемы замещения:

а) нормальный режим, б) режим трехфазного КЗ, в) послеаварийный режим

Рассмотрим случай с использованием в сети ВТСП трансформатора (рисунок 4.4). В начальный момент времени трёхфазного КЗ, передаваемая мощность генератора стремится к нулю, следовательно, угловая характеристика принимает нулевое значение на всём множестве значений δ . Однако, в момент

всплеска тока КЗ происходит резкое увеличение активного сопротивления в цепи, что является следствием потери свойства сверхпроводимости обмоток.

Таким образом, на интервале времени «возникновение КЗ – сохранение сверхпроводимости обмоток трансформатора» выдаваемая генератором активная мощность равна нулю в силу чисто индуктивной нагрузки, а на интервале после потери сверхпроводимости до отключения КЗ выдаваемая активная мощность постоянна и равна мощности тепловыделения в трансформаторе. После отключения КЗ изменение активной мощности происходит по характеристике P_3 . При этом, возникшее активное сопротивление снижает избыточный момент на валу генератора, замедляя ускорение ротора. Появление активного сопротивления вносит существенные изменения в угловые характеристики аварийного и послеаварийного режима. Угловая характеристика послеаварийного режима, учитывающая активное сопротивление цепи при потере сверхпроводящего состояния трансформатора, представляется следующим выражением [100]:

$$P_{П/А} = \frac{E'^2}{\sqrt{R_{ВТСП}^2 + X'_{d\Sigma}^2}} \cdot \sin \alpha + \frac{E' \cdot U_C}{\sqrt{R_{ВТСП}^2 + X'_{d\Sigma}^2}} \cdot \sin(\delta - \alpha), \quad (4.2)$$

где $R_{ВТСП}$ - активное сопротивление ВТСП трансформатора в момент КЗ, α - угол собственной проводимости равный $\alpha = 90^\circ - \arctg \frac{X}{R_{ВТСП}}$.

На рисунке 4.4 представлены угловые характеристики генератора в случае использования ВТСП трансформатора в ЭЭС с параметрами, представленными в таблице 4.1. В начале КЗ мощность генератора падает до 0 (P_2), а после появления в обмотках активного сопротивления (25 Ом) сброс мощности генератора частично компенсируется. При этом ротор генератора ускоряется в меньшей степени, а при использовании трансформаторов с высокими значениями токоограничивающего сопротивления даже начнет тормозиться [69].

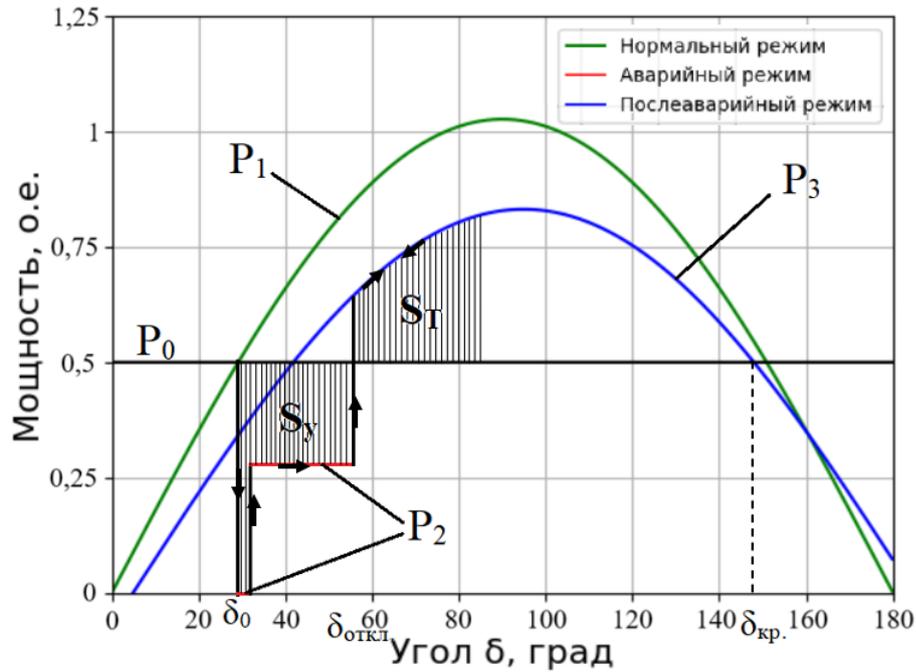


Рисунок 4.4 – Угловые характеристики мощности генератора в случае применения ВТСП трансформатора

Следует отметить, что переходные процессы при появлении активного токоограничивающего сопротивления схожи с включением нагрузочных резисторов. Однако, имеются некоторые отличия, связанные с тем, что активное сопротивление возникает практически сразу при возникновении короткого замыкания, а не в момент отключения КЗ, как в случае включения нагрузочных резисторов. Максимум послеаварийной характеристики (P_3) оказывается смещен относительно исходного режима вправо, что обусловлено появлением активного сопротивления. В результате, площадка ускорения оказывается значительно меньшей в сравнении с вариантом с классическим трансформатором, что свидетельствует о повышении динамической устойчивости генератора.

При этом необходимо отметить, что при длительном нахождении ВТСП проводника в резистивном режиме возможно термическое повреждение его обмоток. Этот процесс объясняется тем, что ток КЗ в большей степени ограничивается несверхпроводящими слоями обмотки, которые могут разрушиться при длительном термическом воздействии. Для увеличения термической устойчивости обмоток и повышения длительности нахождения

трансформатора в резистивном состоянии могут быть применены следующие меры: применение ВТСП лент с большой толщиной стабилизатора или использование гибридной обмотки из ВТСП и медного проводников [101, 102].

4.3 Matlab/Simulink модель электромеханических и тепловых переходных процессов в системе с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором

Для исследования влияния ВТСП трансформаторов на динамическую устойчивость разработана имитационная модель в ППК Matlab/Simulink (рисунок 4.5), обеспечивающая численное решение переходных электромеханических переходных процессов. В качестве объекта моделирования приводится одномашинная система, работающая на ШБМ, схема которой представлена на рисунке 4.1 предыдущего раздела.

Силовая часть 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 снятие следующих величин: токи и напряжения, температура ВТСП обмоток, выдаваемая генератором активная мощность, относительный угол ротора, скорость ротора. Моделирование трехфазного короткого замыкания в момент времени 0,1 с и его дальнейшее устранение через 0,2 с 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. Электрические параметры силовых блоков представлены в таблице 4.1 предыдущего раздела.

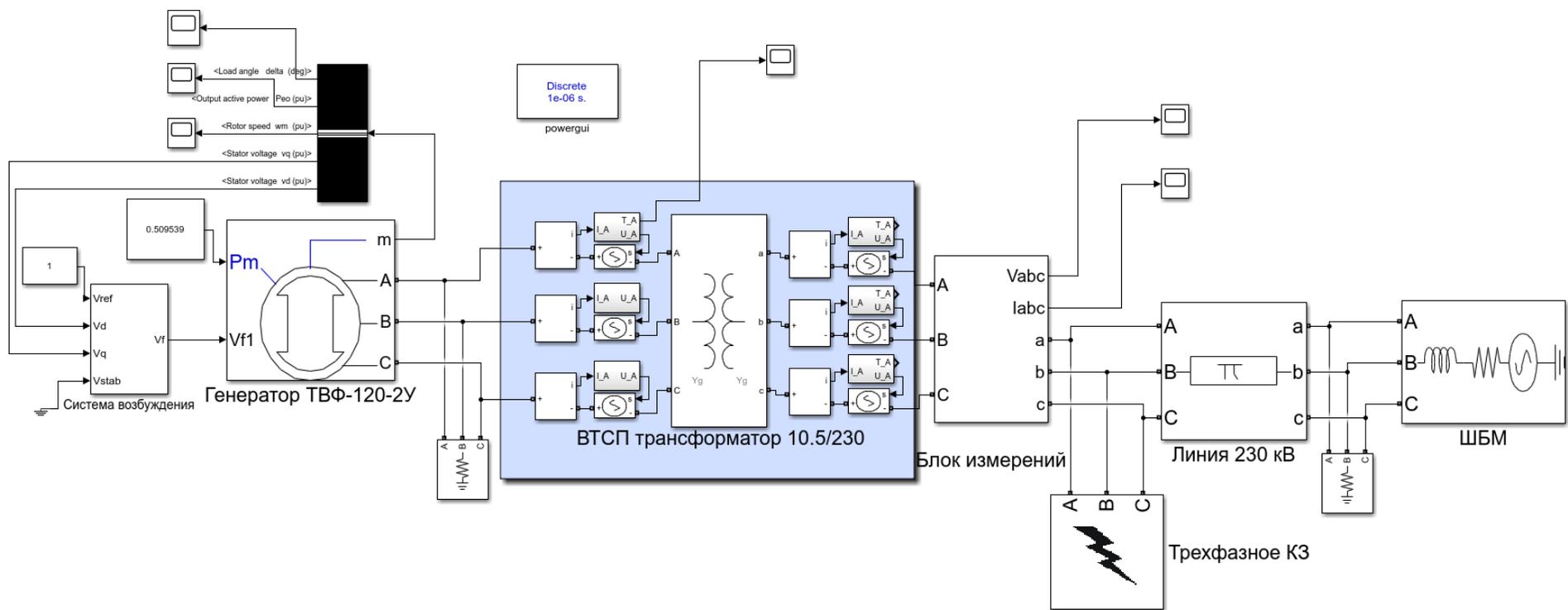


Рисунок 4.5 – MATLAB/Simulink модель исследуемой на динамическую устойчивость ЭЭС

4.4 Исследование переходных процессов в одномашинной электроэнергетической системе с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором с помощью Matlab/Simulink модели

Исследования проводились с целью верификации выводов, полученных при аналитическом анализе устойчивости методом площадей и, в случае согласованности результатов, получения более детальных и количественных характеристик процессов.

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

На рисунках 4.6 и 4.7 представлены графики токов в сети при КЗ для ЭЭС с классическим и ВТСП трансформаторами. На рисунке 4.8 представлена осциллограмма напряжения.

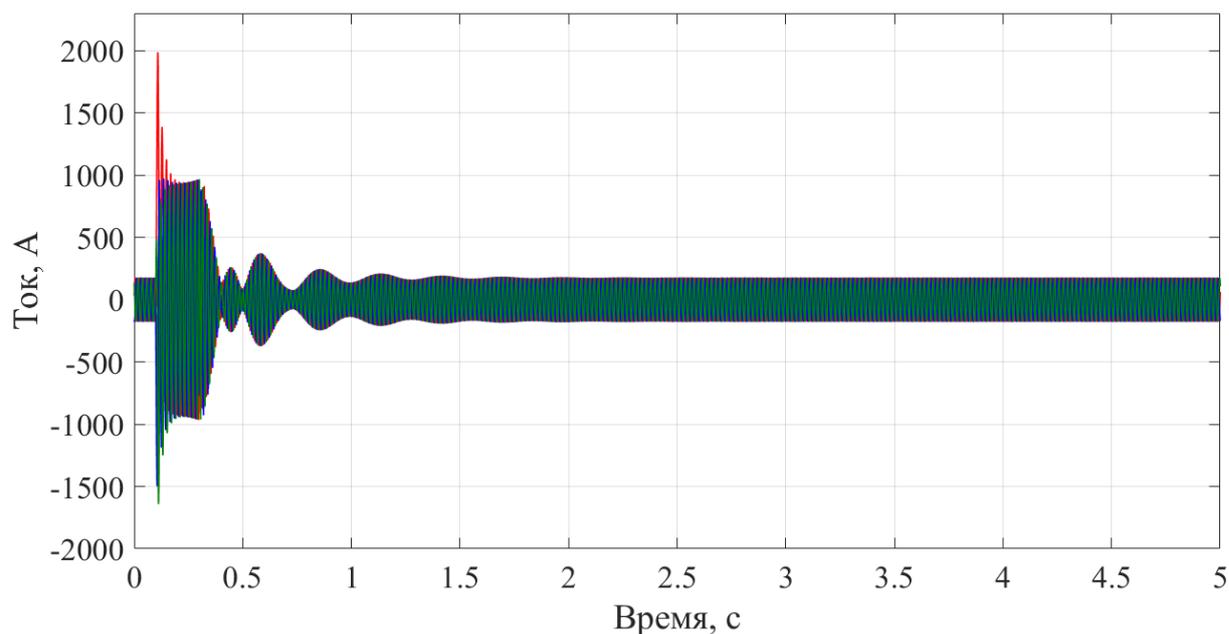


Рисунок 4.6 – Токи в ЭЭС с трансформатором ТРДЦН при трехфазном КЗ в момент перехода напряжения через 0 с

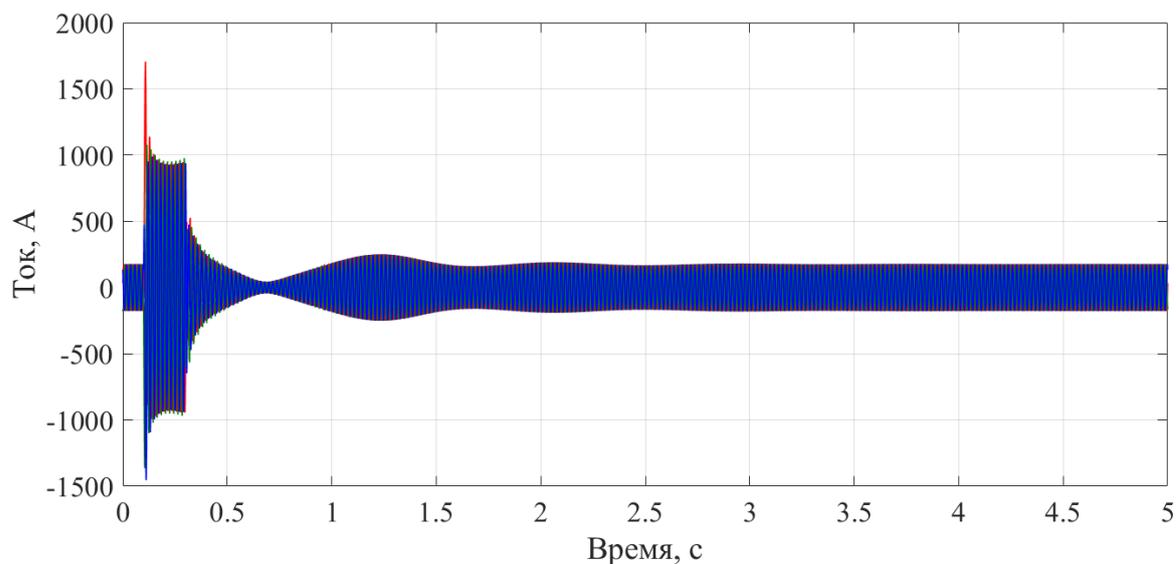


Рисунок 4.7 – Токи в ЭЭС с ВТСП трансформатором при трехфазном КЗ в момент перехода напряжения через 0 с

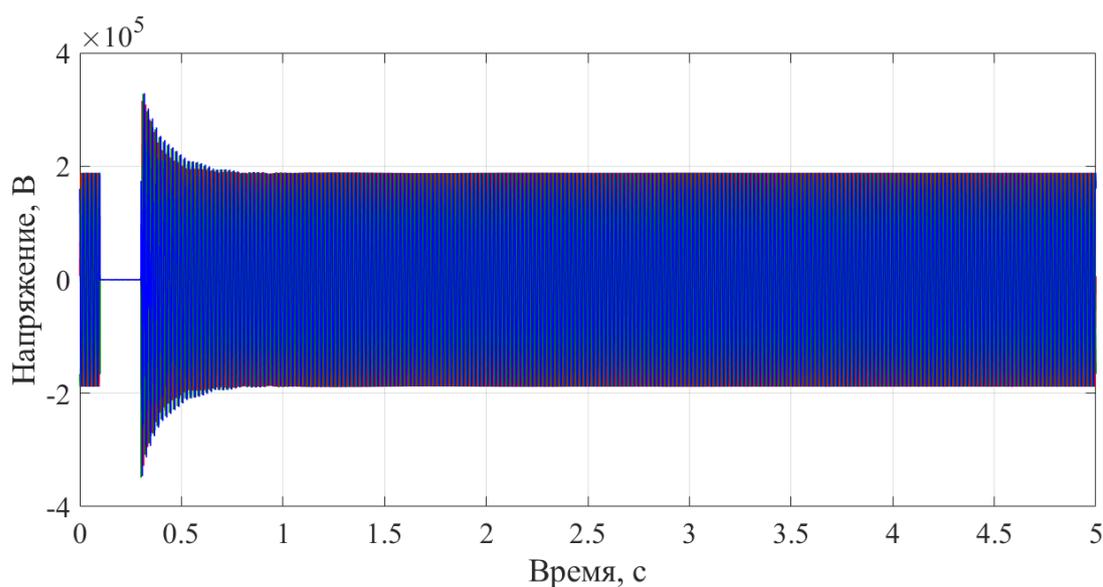


Рисунок 4.8 – Напряжение на выводах обмотки ВН ВТСП трансформатора

На рисунке 4.9 представлены токи фазы А на стороне ВН во время переходного процесса при трёхфазном коротком замыкании в сети, показывающий способность ВТСП трансформатора ограничивать максимальный ток короткого замыкания в переходном процессе. Из осциллограммы видно, что ударный ток снижается в 1,2 раза.

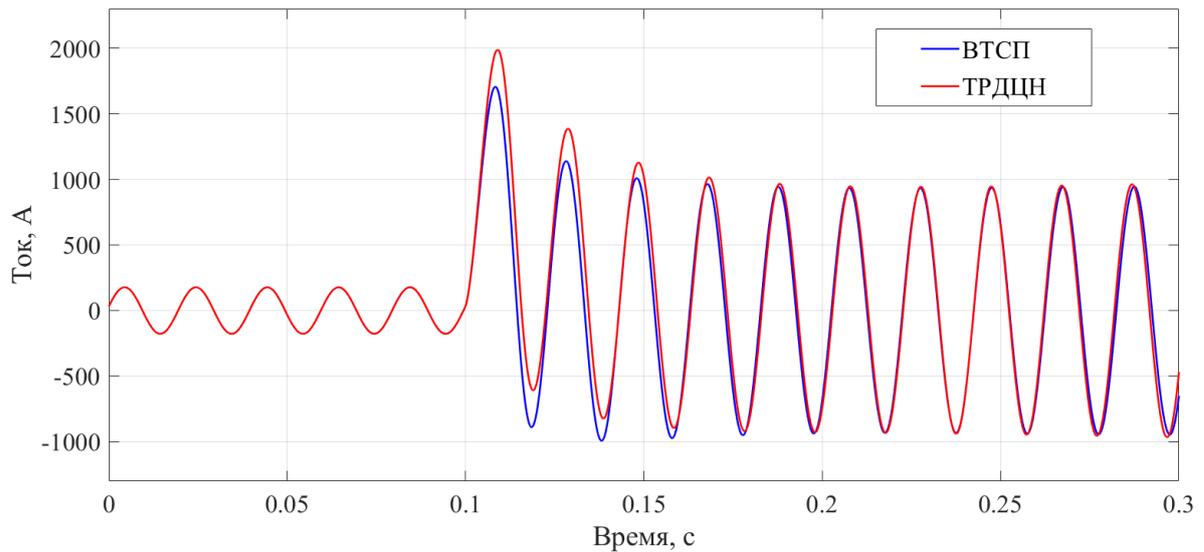


Рисунок 4.9 – Сравнение токов в фазе А в момент трехфазного КЗ

Из представленных графиков переходных процессов видно, что в сети возникают затухающие колебания ротора генератора, обусловленные нарушением баланса активной мощности (моментов ротора) генератора при возникновении КЗ (рисунок 4.10). Можно видеть, что 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.

Сравнение графиков изменения скорости показало (рисунок 4.10), что амплитуда изменений скорости ротора после устранения КЗ уменьшается в 2 раза, что говорит о положительном влиянии ВТСП трансформатора на динамическую устойчивость энергосистемы.

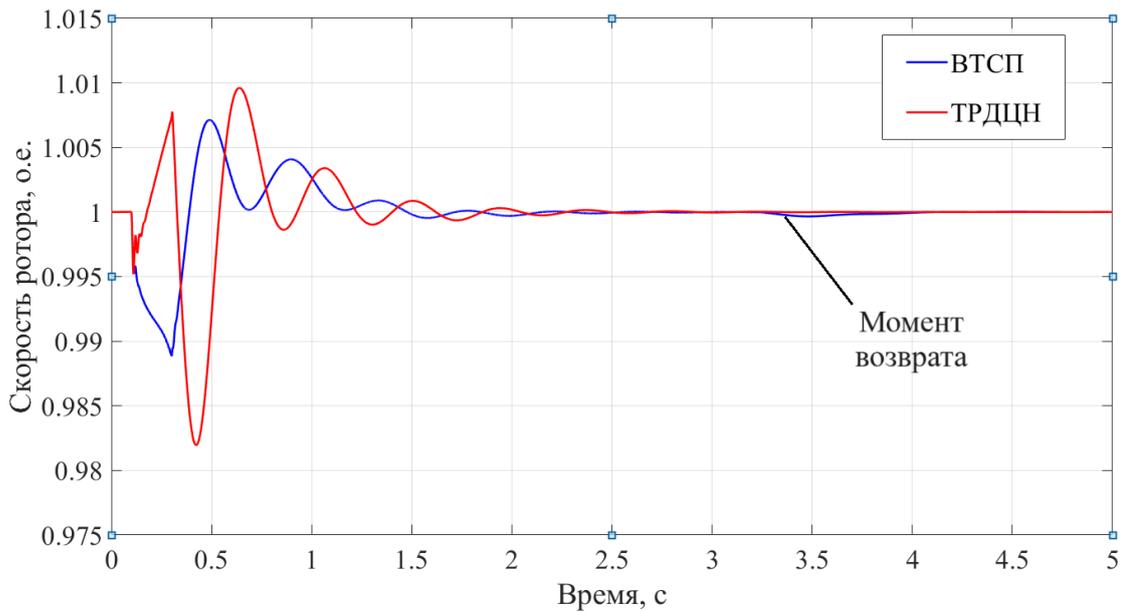


Рисунок 4.10 – Графики скорости ротора в переходном процессе при проходящем КЗ

На рисунках 4.11 и 4.12 приведены расчетные графики взаимного угла ротора, а на рисунках 4.13 и 4.14 - мощности генератора, отдаваемой в сеть. По результатам моделирования видно, что амплитуды изменений относительного угла ротора и отдаваемой мощности генератора в случае использования ВТСП трансформатора значительно ниже, что также свидетельствует о повышении динамической устойчивости энергосистемы [103-105].

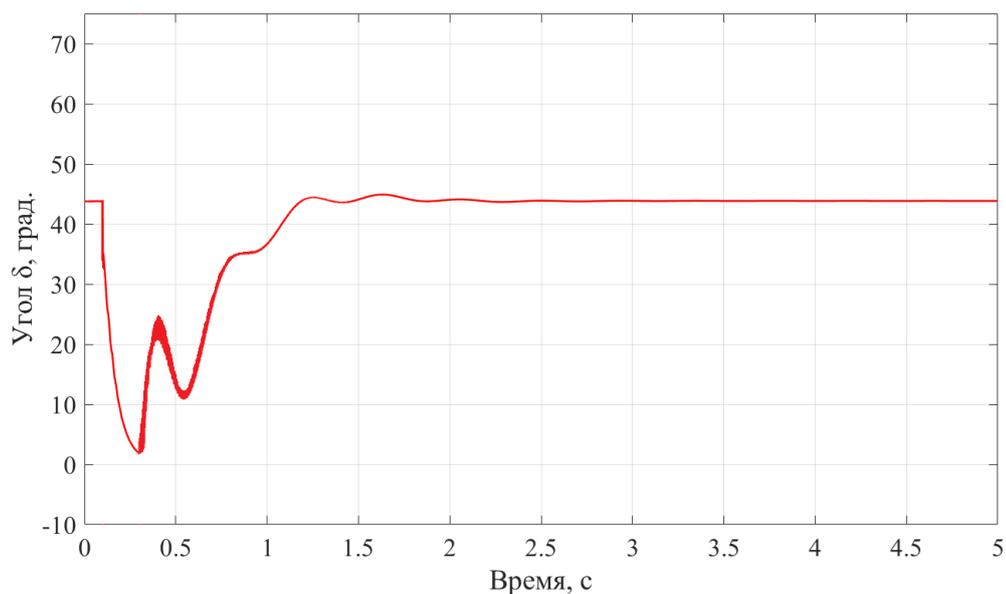


Рисунок 4.11 – График изменения относительного угла ротора генератора для ЭЭС с трансформатором ТРДЦН

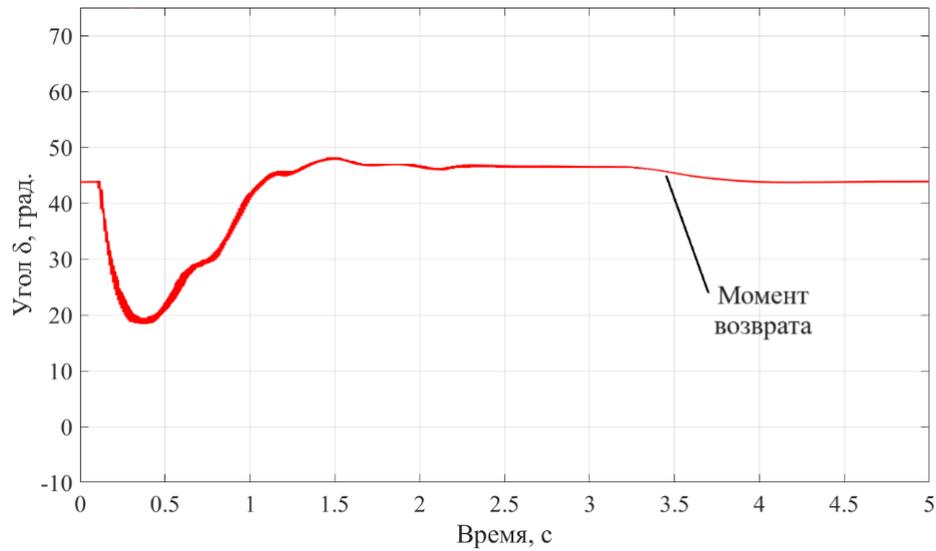


Рисунок 4.12 – График изменения относительного угла ротора генератора для ЭЭС с ВТСП трансформатором

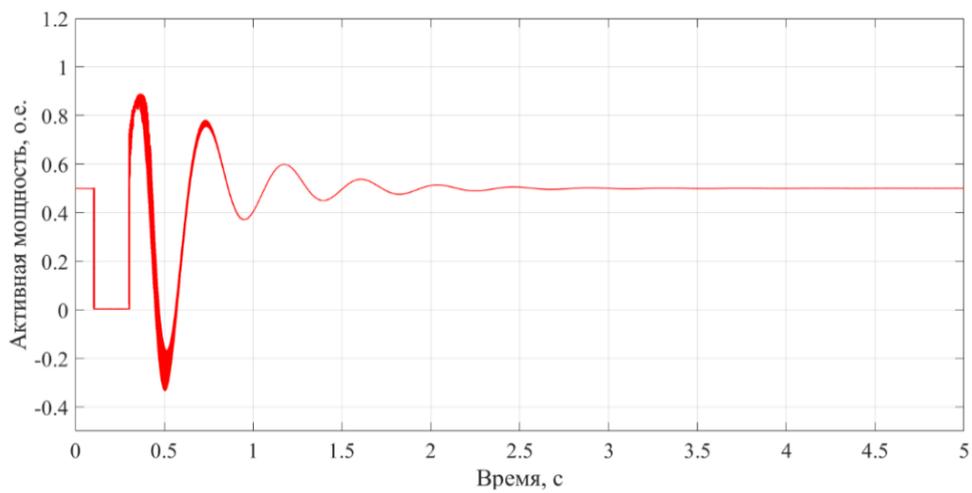


Рисунок 4.13 – График изменения мощности генератора для ЭЭС с трансформатором ТРДЦН

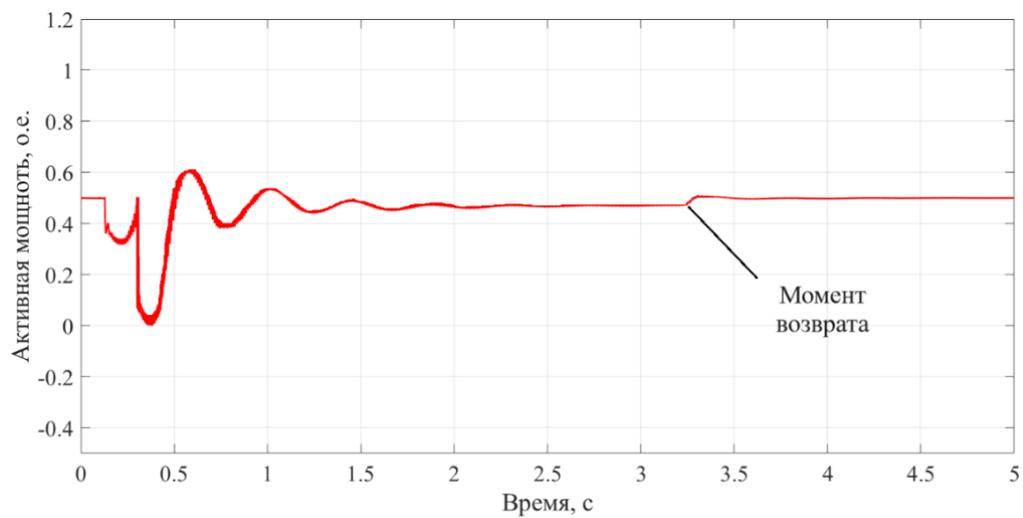


Рисунок 4.13 – График изменения мощности генератора для ЭЭС с ВТСП трансформатором

На приведенных выше графиках изменения угла и выдаваемой мощности генератора отмечен момент возврата сверхпроводящего состояния обмоток трансформатора.

Разработанная модель также позволила получить графики изменения температуры обмоток трансформатора во времени (рисунки 4.14 и 4.15), необходимые для анализа теплового воздействия тока КЗ на сверхпроводящие обмотки трансформатора.

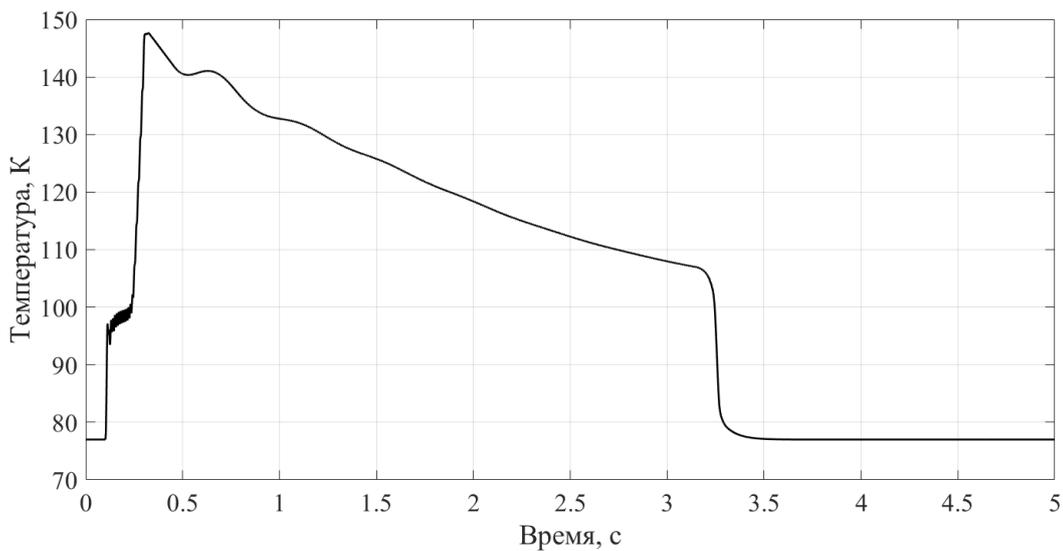


Рисунок 4.14 - Температура обмотки ВТСП трансформатора при длительности КЗ 0,2 с

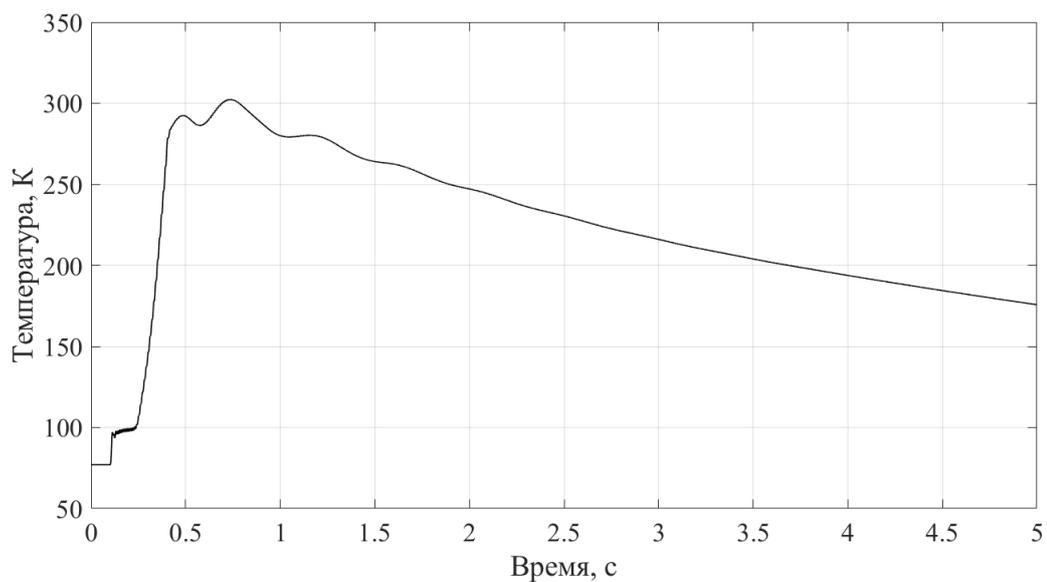


Рисунок 4.15 - Температура обмотки ВТСП трансформатора при длительности КЗ 0,3 с

Температура обмоток во время КЗ достигает 148 К, и через 3,2 секунды после устранения КЗ, трансформатор успешно возвращает сверхпроводящее состояние. Представленный выше процесс представляет собой безопасный режим с возвратом ВТСП обмоток в сверхпроводящее рабочее состояние.

Если же увеличить длительность КЗ до 0,3 с, то по графику изменения температуры (рисунок 4.15) наблюдается тепловой невозврат, что вызовет повреждение обмоток ВТСП трансформатора при длительности такого режим свыше 5 с [41, 52].

Рассмотрим случаи, когда активное сопротивление обмоток ВТСП трансформатора при КЗ будет составлять не 25 Ом, а 50 Ом и 100 Ом.

На рисунках 4.16 и 4.17 представлены графики токов в фазе А и скорости ротора при КЗ при токоограничивающем сопротивлении ВТСП трансформатора 50 Ом. В этом случае коэффициент ограничения тока увеличивается с 1,2 до 1,36, однако, 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.

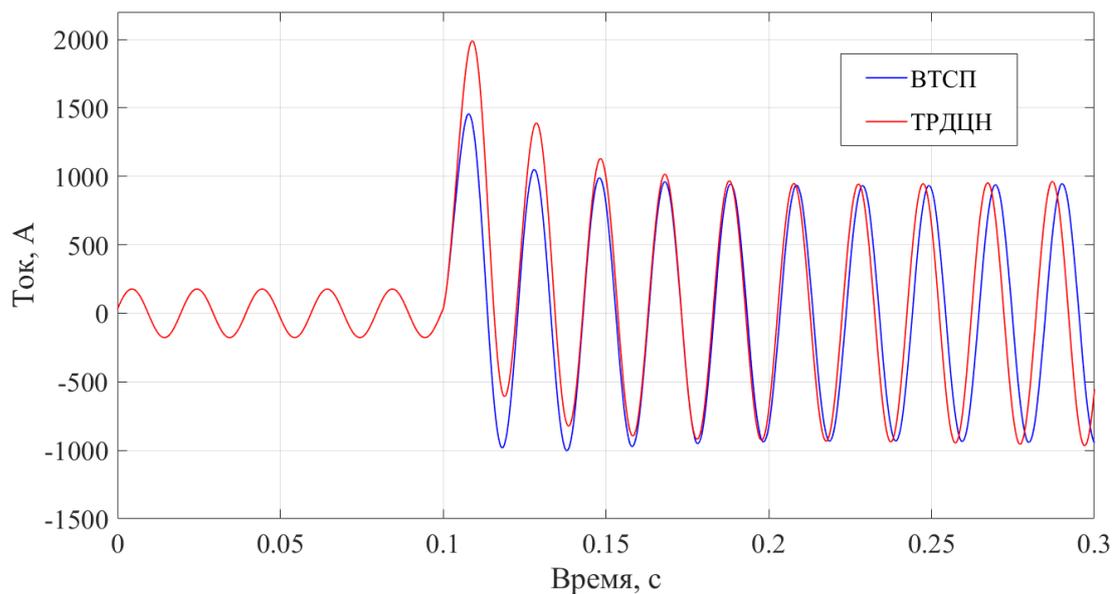


Рисунок 4.16 – Графики токов в фазе А при активном сопротивлении ВТСП трансформатора 50 Ом

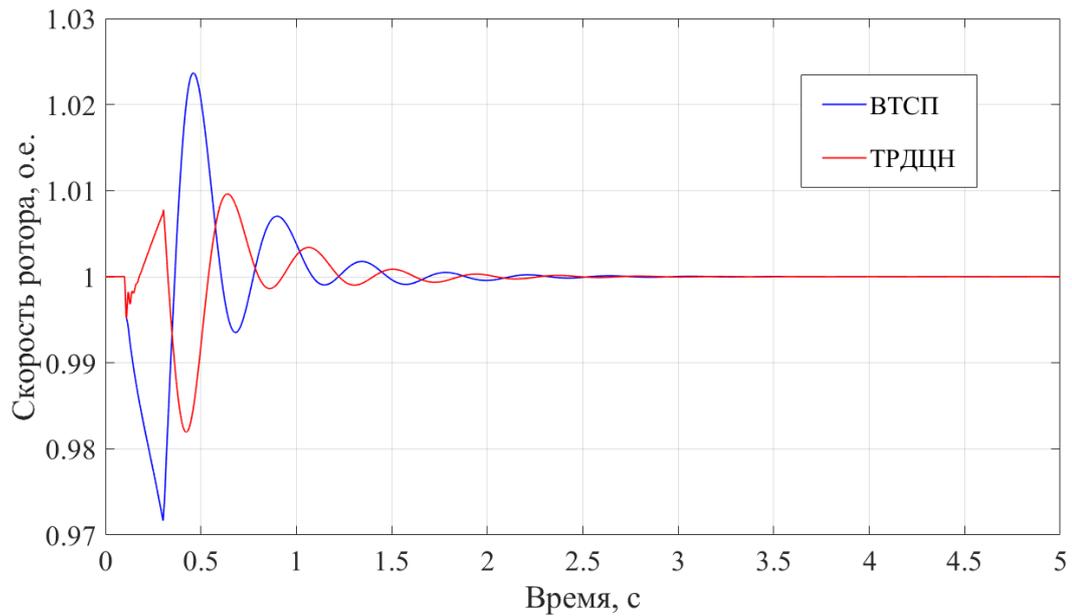


Рисунок 4.17 – Графики скорости ротора при активном сопротивлении ВТСП трансформатора 50 Ом

В экспериментах с теми же исходными параметрами и активным сопротивлением равным 100 Ом были получены графики тока и скорости ротора (рисунки 4.18, 4.19), которые показывают, что вследствие чрезмерного торможения ротора генератор выпадает из синхронизма, что является недопустимым с точки зрения безопасности функционирования энергосистемы.

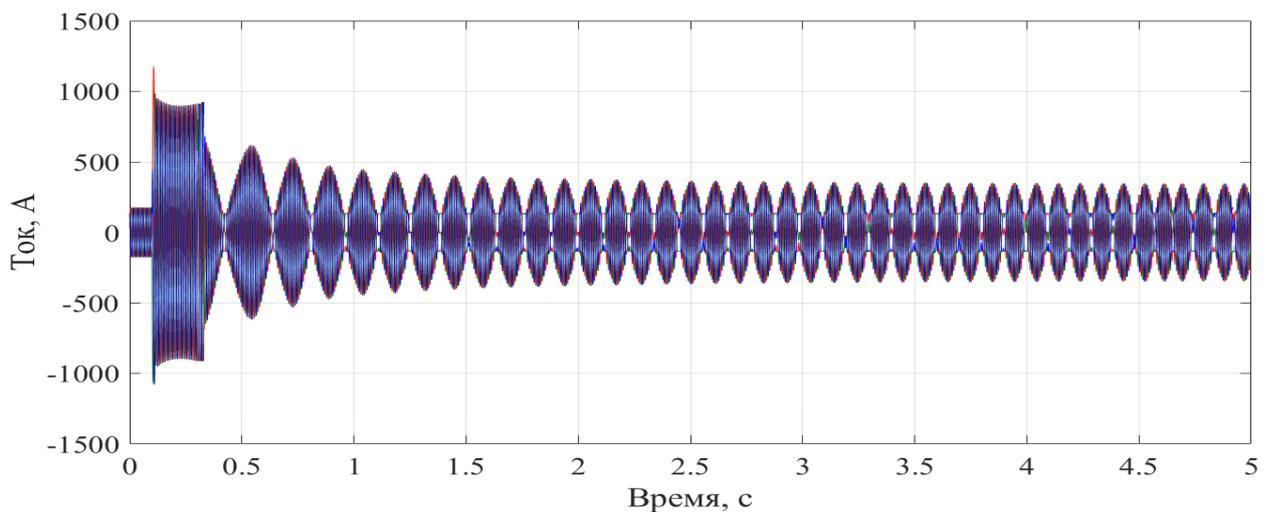


Рисунок 4.18 – Ток в фазе А при активном сопротивлении ВТСП трансформатора 100 Ом

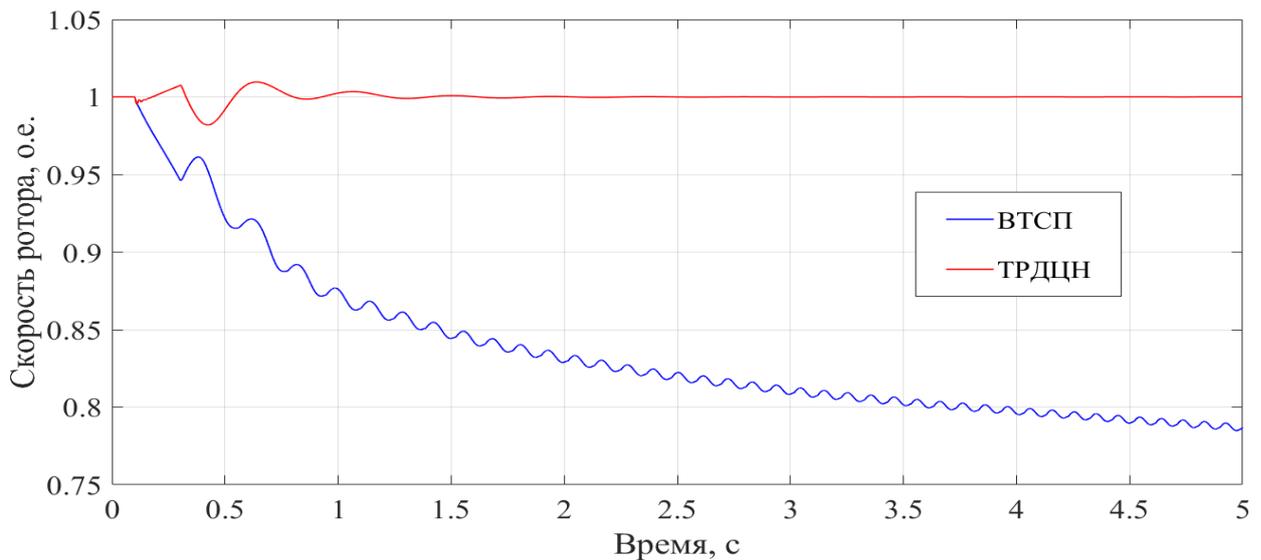


Рисунок 4.19 – Изменение скорости ротора при активном сопротивлении ВТСП трансформатора 100 Ом

Выводы по главе 4

1. Разработанная имитационная модель в среде Matlab/Simulink, впервые позволяет совместно рассчитывать электромеханический и тепловой переходные процессы в сети с ВТСП трансформатором при коротком замыкании. Результаты моделирования согласуются с результатами исследований, полученных для сверхпроводящих токоограничителей резистивного типа [36], что свидетельствует об адекватности модели.

2. 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, как правило, происходит повышение динамической устойчивости параллельной работы синхронных генераторов за счет частичной компенсации снижения мощности генератора при КЗ. При определенных условиях, если возникающее сопротивление создает значительное превышение предшествующей КЗ мощности, возможно и снижение устойчивости за счет переторможения ротора генератора.

3. Длительность КЗ существенным образом влияет на тепловую устойчивость обмоток трансформатора. Превышение расчетной длительности короткого замыкания вызывает перегрев обмоток, из-за чего длительность нахождения обмоток ВСПП трансформатора в резистивном состоянии возрастает, что ведет к повреждению изоляции обмоток и отключению трансформатора.

4. Тепловая устойчивость обмоток и эффективное токоограничивающее сопротивление играют ключевую роль для обеспечения динамической устойчивости генератора при КЗ. Теплоемкости криостата, охлаждающей жидкости и обмоток должны быть рассчитаны для поглощения выделяющегося при потере сверхпроводящего состояние тепла, а длительность КЗ должна быть ограничена релейной защитой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты настоящего 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. В электроэнергетике востребованы токоограничивающие устройства, позволяющие ограничить токи короткого замыкания в сетях за очень короткий промежуток времени и эту функцию способен обеспечить высокотемпературный сверхпроводящий трансформатор.

2. Разработаны математическая и имитационная модели, способные рассчитывать электромагнитные и тепловые переходные процессы при включении ВТСП трансформатора и при КЗ с учетом критических параметров сверхпроводника, особенностей системы охлаждения жидким азотом. На основе данных моделей определен характер электротеплового поведения устройства при допущении, что обмотки устройства являются сосредоточенными элементами с изотропностью свойств ВТСП ленты и окружающего хладагента.

3. Сконструировано два образца силовых ВТСП трансформаторов с функцией ограничения тока. Доказано, что трансформаторы с ВТСП обмотками возможно 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. Проведены физические и теоретические эксперименты короткого замыкания в низковольтной распределительной сети с ВТСП трансформатором. Установлено снижение ударного тока КЗ в 2,95 раза. Однако, появляющиеся большие

тепловыделения в обмотках при КЗ, могут приводить к повышению температуры с необратимым перегревом ВТСП ленты, термическому и механическому повреждению обмоток.

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. Предлагается использование системы с контролем момента включения, что позволит снизить пусковой ток до значений 5-10% от номинального.

5. Разработанная в ПВК Matlab/Simulink математическая модель адаптирована для проведения расчетов электромагнитных и тепловых переходных процессов в трехфазной сети с ВТСП трансформатором при варьировании видов КЗ.

6. Выявлено влияние показателя степени ВАХ обмоток трансформатора на эффективность токоограничивающей функции. Проведен ряд экспериментов при варьировании показателя ВАХ в диапазоне от 15 до 35. 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. Определены оптимальные показатели ВАХ ВТСП лент для применения в электротехнических устройствах с токоограничивающей функцией.

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

8. Предложен критерий возврата сверхпроводящего состояния ВТСП трансформатора по величине кратности тока КЗ к номинальному току.

9. Предложены меры по обеспечению тепловой устойчивости обмоток при ограничении тока КЗ и включении ВТСП трансформатора.

10. Разработана численная имитационная модель в среде Matlab/Simulink, позволяющая впервые совместно оценить электромеханический и тепловой переходный процессы в сети с ВТСП трансформатором при коротком замыкании. Результаты моделирования с достаточной степенью точности согласуются с результатами исследований, полученных для сверхпроводящих токоограничителей резистивного типа, что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

11. 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 работы синхронных генераторов в электроэнергетической системе.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АПВ – Автоматическое повторное включение
- ВАХ – Вольт-амперная характеристика
- ВН – Высокое напряжение
- ВТСП – Высокотемпературная сверхпроводимость
- КЗ – Короткое замыкание
- КПД – Коэффициент полезного действия
- НИиОКР - Научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа
- НН – Низкое напряжение
- НПВХ – Непластифицированный поливинилхлорид
- МТЗ – Максимальная токовая защита
- ПВК – Программно-вычислительный комплекс
- СОТ – Сверхпроводящий ограничитель тока
- СП – Сверхпроводящий
- СЭС – Система электроснабжения
- ТО – Токовая отсечка
- ШБМ – Шины бесконечной мощности
- ЭВМ – электронная вычислительная машина
- ЭДС – Электродвижущая сила
- ЭЭС – Электроэнергетическая система

СПИСОК ТЕРМИНОВ

Автоматическое повторное включение (АПВ) - коммутационный цикл, при котором выключатель вслед за его отключением автоматически включается через установленный промежуток времени.

Бестоковая пауза при АПВ - интервал времени между окончательным погасанием дуги во всех полюсах при операции отключения и первого появления тока в любом из полюсов при последующей операции включения.

Динамическая устойчивость электроэнергетической системы – способность системы восстанавливать исходное или близкое к нему состояние после крупных возмущений (например, отключения линий, коротких замыканий), сохранив при этом синхронный режим работы генераторов.

Имитационная модель – формализованное представление реальной системы или процесса, реализованное посредством математического аппарата, алгоритмических структур или физических аналогов, предназначенное для исследования динамики системы в контролируемых условиях посредством компьютерного или аналитического моделирования.

Кризис кипения — явление резкого ухудшения теплообмена между нагретой поверхностью и кипящей жидкостью, сопровождающееся падением коэффициента теплоотдачи и возможным перегревом поверхности.

Критические параметры высокотемпературного сверхпроводника – условия, при которых сверхпроводящий материал переходит в резистивное состояние. Для ВТСП трансформаторов ключевыми являются: критическая температура, критическое магнитное поле, критический ток.

Математическая модель – математическое представление реального объекта, явления или процесса, используемое для описания его свойств и закономерностей.

Показатель степени n ВАХ сверхпроводника (n) – параметр, отражающий однородность и качество сверхпроводника. Чем выше n , тем ближе

материал к идеальному сверхпроводнику с резким переходом в резистивное состояние.

Потеря сверхпроводимости – внезапный переход сверхпроводящего материала в обычное, проводящее состояние, при котором исчезает его способность к нулевому сопротивлению. Это явление может происходить в сверхпроводящих электромагнитах и других устройствах при превышении критического значения температуры, поля или тока.

Прототип — это первоначальный, экспериментальный, функциональный образец устройства, системы или материала, созданный для проверки концепции или процесса, демонстрации работоспособности перед разработкой конечного продукта.

Резистивное состояние высокотемпературного сверхпроводника – возникает при нарушении условий сверхпроводимости (превышении одного или нескольких критических параметров) и приводит к появлению сопротивления.

Сверхпроводники второго рода представляют собой класс сверхпроводящих материалов, характеризующихся наличием двух критических магнитных полей ($H_{к1}$ и $H_{к2}$) и способностью находиться в смешанном состоянии при промежуточных значениях магнитного поля. В этом состоянии магнитный поток проникает в образец в виде вихрей Абрикосова при определенных условиях, сохраняя при этом нулевое электрическое сопротивление.

Тепловая устойчивость ВТСП ленты — способность сохранять стабильные сверхпроводящие свойства и механическую целостность при рабочих температурах, а также при возможных тепловых возмущениях (например, переходе в резистивное состояние).

Термическая стойкость — это способность электрооборудования, токоведущих частей или электрических аппаратов выдерживать нагрев под действием токов короткого замыкания без повреждений или деформаций, сохраняя работоспособность.

Транспортный ток — это электрический ток, протекающий через сверхпроводник при подключении к внешнему источнику напряжения.

Численное моделирование – решение математических моделей с помощью вычислительных алгоритмов приближенными методами, допускающими появление погрешности, когда аналитическое решение невозможно.

Физическая модель – это модель, создаваемая путем замены объектов моделирующими устройствами, которые имитируют определённые характеристики, процессы, свойства этих объектов. При этом моделирующее устройство имеет ту же качественную природу, что и моделируемый объект.

Ударный ток короткого замыкания - наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания в одной из фаз трехфазной электрической цепи, которое имеет место, когда короткое замыкание происходит в момент прохождения напряжения этой фазы через нулевое значение, а до возникновения короткого замыкания ток в цепи носит емкостной характер или отсутствует.

Электромагнитный переходный процесс – изменение электромагнитных параметров в электрической цепи или системе, происходящее в момент перехода от одного стационарного состояния к другому.

Электромеханический переходный процесс – переход системы из одного стационарного состояния в другое, вызванный возмущением, например, изменением нагрузки, аварией или коммутациями. Этот процесс включает в себя как электромагнитные, так и механические изменения, такие как колебания роторов генераторов и двигателей, которые могут протекать до установления нового стационарного состояния.

Эффект Мейснера – явление, при котором магнитное поле полностью вытесняется из объема сверхпроводника при переходе в сверхпроводящее состояние.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазыкин, В.Г. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебное пособие / В.Г. Сазыкин, А.Г. Кудряков. – 2-е изд., исправ. и доп. - Краснодар: КубГАУ, 2017. – 255 с.
2. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник / С. А. Ульянов. – Москва: Энергия, 1970. – 520 с.
3. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2007
4. Папков, Б. В. Электроэнергетические системы и сети. Токи короткого замыкания: учебник и практикум для вузов / Б. В. Папков, В. Ю. Вуколов. — 3-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2010. — 353 с.
5. Рожкова, Л.Д. Электрооборудование станций и подстанций / Л.Д. Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.В. Чиркова – М.: Академия, 2007. – 448 с.
6. A. Safaei, M. Zolfaghari, M. Gilvanejad, and G. V. Gharehpetian. A survey of fault current limiters: Development and technical aspects // *Elect. Power Energy Syst.* – 2020. – Vol. 118. – Art. no. 105729.
7. Шмидт, В.В. Введение в физику сверхпроводников. изд.2-е, испр. и доп. М.: МЦНМО, 2000 г. – 402 с
8. Гинзбург, В. Л. Сверхпроводимость. 2-е изд., испр. и доп. / Гинзбург В. Л., Андрияшин Е. А. // Москва: Альфа-М, 2006. - 110 с.
9. Wilson M.N. 100 Years of Superconductivity and 50 Years of Superconducting Magnets // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity.* – 2012. – Vol. 22, No3. – P. 3800212.
10. Bednorz J.G. Perovskite-type oxides – The new approach to high-T_c superconductivity / J.G. Bednorz, K.A. Müller // *Revs. Mod. Phys.* – 1988. – Vol. 60, iss. 3. – P. 585.

11. Kai Wang, Hao Dong, Daxing Huang et al. Advances in second-generation high-temperature superconducting tapes and their applications in high-field magnets // *Soft Sci*, 2022, Vol. 2, no 12, pp. 1-28, DOI: 10.20517/ss.2022.10
12. Uglietti D. A review of commercial high temperature superconducting materials for large magnets: from wires and tapes to cables and conductors// *Supercond. Sci. Technol.* – 2019. – Vol. 32., no 5, – P. 053001.
13. С.В. Самойленков, А.И. Кучаев, С.С. Иванов, А.Р. Кауль. Ленты на основе высокотемпературных сверхпроводников: технологии и перспективные применения. Часть 1 // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*, 2011, - № 10, - С. 140-148.
14. Zhu, J.; Chen, S.; Jin, Z. Progress on Second-Generation High-Temperature Superconductor Tape Targeting Resistive Fault Current Limiter Application. *Electronics*, 2022, vol. 297 no 11. <https://doi.org/10.3390/electronics11030297>
15. Samoilenkov S., Molodyk A., Lee S., Petrykin V., Kalitka V., Martynova I., Makarevich A., Markelov A., Moyzykh M., Blednov A. Customised 2G HTS wire for applications. *Superconductor Science and Technology*, 2016, vol. 29, pp. 1-10.
16. Molodyk A., Samoilenkov S., Markelov A., Lee S., Petrykin V., Gaifullin M., Kesler L., Vasiliev A. Development and large volume production of extremely high current density YBa₂Cu₃O₇ superconducting wires for fusion. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, pp. 1-11., Art. no. 2084.
17. Ren, L., Guo, S., Chen, G., Su, L., Xu, Y., Shi, J., & Chen, L. (2020). Experimental Research on Critical Current Behavior of Various Commercial HTS Tapes. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 30(4), 1–6. doi:10.1109/tasc.2020.2977933
18. Elshiekh, Mariam; Zhang, Min; Ravindra, Harsha; Chen, Xi; Venuturumilli, Sriharsha; Huang, Xiaohua; Schoder, Karl; Steurer, Michael; Yuan, Weijia (2018). Effectiveness of Superconducting Fault Current Limiting Transformers in Power Systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, (), 1–1. doi:10.1109/TASC.2018.2805693.

19. Ibrahim Olanrewaju Alade, Md Safiqur Rahaman, Talal F. Qahtan. A Comprehensive Review of Superconductivity Research Productivity // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, - 2022, - vol. 35(10), - P. 1-17
20. Kiyosumi Tsuchiya¹, Xudong Wang¹, Shinji Fujita, Ataru Ichinose, Kyohei Yamada. Superconducting properties of commercial REBCO-coated conductors with artificial pinning centers. Supercond. Sci. Technol., - 2021, - Vol. 34, P. 105005
21. American Superconductor. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.amsc.com/> (дата обращения 20.10.2023).
22. Fujikura Ltd. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fujikura.com/> (дата обращения 20.10.2023).
23. Shanghai Superconducting Technology Co., Ltd. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.shsctec.com/index.php?m=list&a=index&classid=51> (дата обращения 20.10.2023).
24. Superconductor, Nano and Advanced Materials (Sunam). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.i-sunam.com/> (дата обращения 20.10.2023).
25. ЗАО «СуперОкс». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.superox.ru/> (дата обращения 20.10.2023).
26. SuperPower Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.superpower-inc.com/> (дата обращения 20.10.2023).
27. THEVA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.theva.com/> (дата обращения 20.10.2023).
28. Alam, Md; Abido, Mohammad; El-Amin, Ibrahim. Fault Current Limiters in Power Systems: A Comprehensive Review // Energies, 2018, vol. 11, no. 5, pp. 1-24, Art. no. 1025.
29. Jiamin Zhu, Sikan Chen, Zhijian Jin. Progress on Second-Generation High-Temperature Superconductor Tape Targeting Resistive Fault Current Limiter Application // Electronics, 2022, vol. 11, pp. 1-20, art. No. 297.
30. Ковалев, Л.К. Зарубежные и российские разработки в области создания сверхпроводниковых электрических машин и устройств / Л.К. Ковалев,

К.Л. Ковалев, И.П. Колчанова, В.Н. Полтавец // Известия академии наук. Энергетика. – 2012. – №6. – С. 3-26.

31. T. Janowska, B. Kondratowicz-Kucewicza, G. Wojtasiewicz, S. Kozaka, J. Kozaka, M. Majka, L. Jaroszyński. Superconducting Devices for Power Engineering // Proceedings of the XVII National Conference on Superconductivity, 2016, Vol. 130, no. 2, pp. 537-544.

32. Chen X., Chen Y., Shen B., Zhang M., Pang Z., Jiang S., Gou H. Superconducting fault current limiter (SFCL) for a power electronic circuit: experiment and numerical modelling // Superconductor Science Technology, 2022, vol.35, No 4, p.4500.

33. Joanna KOZIE, Damian GNAT, Michał MAJKA, Yerbol Turgynebekov. The latest superconducting short current limiters - review of selected solutions // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, 2022, vol. 96, no. 2, pp. 156-159.

34. Fisher L. M. Superconducting fault current limiter for railway transport // Physics of Atomic Nuclei. – 2015. – T. 78, №. 14. – P. 1654–1657.

35. Kosa, Janos A; Shao, Qing; Zhu, Huiyun; Yu, Yueyue; Vajda, Istvan. Detailed Review of a Novel Model SFCL for Grid. Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol. 1559, art. No. 012105, pp. 1-12.

36. M. Moyzykh [et al.] First Russian 220 kV Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) For Application in City Grid // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2021. – Vol. 31. – № 5, – P. 1–7, – Art no. 5601707.

37. Brilinskii, A. S.; Evdokunin, G. A.; Kuzâmin, I. A.; Magdeev, N. N.; Moizykh, M. E.; Selâkova, M. A. Specific Application Features of Current-Limiting Devices Based on High-Temperature Superconductivity in High-Voltage Electric Networks // Power Technology and Engineering, 2020, vol. 53, no. 6, pp. 751-759.

38. Irannezhad, F., Heydari. Conducting a Survey of Researches on High Temperature Superconducting Transformers // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, - 2020, - Vol. 30, - No. 6, - P. 1-13.

39. Komarzyniec G. The Risk of Thermal Damage to the HTS Transformer's Coils During the Inrush Current // 2018 Conference on Electrotechnology: Processes,

Models, Control and Computer Science (EPMCCS). – 2018, - Kielce, Poland, - pp. 1-4. doi:10.1109/EPMCCS.2018.8596610

40. Hellmann S., Abplanalp M., Elschner S., Noe M. Current Limitation Experiments on a 1 MVA-Class Superconducting Current Limiting Transformer // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, vol. 29, no. 5, pp. 1-7, Art. no. 5501706.

41. Wojtasiewicz G. Fault Current Limitation by 2G HTS Superconducting Transformer-Experimental Investigation //Acta Physica Polonica A. – 2016. – T. 130. – №. 2. – P. 516-520.

42. Elshiekh, Mariam; Zhang, Min; et. all / Effectiveness of Superconducting Fault Current Limiting Transformers in Power Systems // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, - 2018, - Vol. 28, - No. 3, - P. 1-7.

43. Hellmann S., et al., “Manufacturing of a 1-MVA-Class superconducting fault current limiting transformer with recovery-under-load capabilities,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity. vol. 27, №4, pp.1-6, 2017.

44. Dai S. et al., “Development of a 1250-kVA Superconducting Transformer and Its Demonstration at the Superconducting Substation,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, №1, pp. 1-7, 2017.

45. Hekmati A., et al., “HTS Transformer Windings Design Using Distributive Ratios for Minimization of Short Circuit Forces,” J Superconductivity Novel Magnetism, vol. 32, №2, pp. 151-158, 2019.

46. Gu C., Lai L., Bai G. “Electromagnetic Analysis of an Air-Core HTS Transformer,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 29, N2, p. 5501003, 2020.

47. Moradnouri A., et al., “Survey on High-Temperature Superconducting Transformer Windings Design,” Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, vol. 33, N9, pp. 2581-2599, 2020.

48. A Morandi, L Trevisani, P L Ribani, M Fabbri, L Martini and M Bocchi. Superconducting transformers: key design aspects for power applications // Journal of Physics: Conference Series. – 2008, - №97, - P. 1-10.

49. Батенин, В.М. Сверхпроводниковая электроэнергетика / В.М. Батенин, В.В. Желтов, С.С. Иванов, С.И. Копылов, С.В. Самойленков // Известия академии наук. Энергетика. – 2011. – №5. – С. 79-87.

50. Манусов, В. З. Обзор конструкций трансформаторов со сверхпроводящими обмотками Манусов В. З., Крюков Д.О. // Электричество. – 2019. - №8. – С. 4-16.

51. Janowski T., et al., “Superconducting Devices for Power Engineering,” Proceedings of the XVII National Conference on Superconductivity, Vol. 130, № 2, pp. 537-544, 2016.

52. M. Iwakuma et al., “Development of a 3φ-66/6.9 kV-2 MVA REBCO superconducting transformer,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 25, no. 3, Jun. 2015, Art. no. 5500206.

53. F. Nakamura, M. Iwakuma, S. Miura, K. Yoshida, A. Tomioka, and M. Konno, “Numerical analysis of current-limiting cooperation of a 20 MVA superconducting transformer and cable,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 29, no. 5, Aug. 2019, Art. no. 5502105.

54. L. Jaroszynski, G. Wojtasiewicz, and T. Janowski, “Considerations of 2G HTS transformer temperature during short circuit,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 28, no. 4, Jun. 2018, Art. no. 5500205.

55. E. Pardo, M. Staines, Z. Jiang, and N. Glasson, “AC loss modelling and measurement of superconducting transformers with coated-conductor Roebel-cable in low-voltage winding,” Supercond. Sci. Technol., vol. 28, 2015, Art. no. 114008.

56. ГОСТ 23869-79. Материалы сверхпроводящие. Термины и определения. - Введ. 1981-01-01.- М., 2005.- 4 с.

57. Зубко В.В. Моделирование теплофизических и электрофизических процессов для исследования и оптимизации конструкций сверхпроводящих кабелей и проводов: дисс. ... докт. техн. наук: 05.09.02. – Москва, 2017 – 250 с.

58. Фетисов С.С. Исследования и разработка токонесущих элементов коаксиальных кабелей, токовводов и проводников на основе

высокотемпературных сверхпроводящих материалов второго поколения: дисс. ... докт. техн. наук: 05.09.02. – Москва, 2022 – 277 с.

59. Сотников Д.В. Исследование токонесущих свойств перспективных высокотемпературных сверхпроводящих материалов для электротехнических устройств: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.02. – Москва, 2016 – 126 с.

60. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. - М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. - 288 с.

61. Komarzyniec G. Calculating the Inrush Current of Superconducting Transformers // Energies. – 2021. - № 14. – P. 1-19.

62. Основы теории цепей : учеб. для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 4-е изд., перераб. – Москва : Энергия, 1975. – 752 с.: ил.

63. Тихомиров, П. М. Расчёт трансформаторов : учеб. пособие для вузов / П. М. Тихомиров. – 4-е изд., перераб., и доп. – Москва : Энергия, 1976. – 544 с.

64. Wilson, M.N. Superconducting Magnets: Oxford University Press, New York, 1990. - NY, USA, 1990. – 352 p.

65. Lei, H.; Wang, K. et. all. Iron chalcogenide superconductors at high magnetic fields // Sci. Technol. Adv. Mater. – 2012. - No 13, Art. no. 054305.

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

67. 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.

68. Ivanov D.M., Manusov V.Z. Study of Electromagnetic and Thermal Transients in a High-temperature Superconducting Transformer during a Short Circuit // Problems of the Regional Energetics. - 2023. – Vol. 58. – № 2. P. 1-12.

69. Александров, Н. В. Исследование влияния сверхпроводниковых трансформаторов на режимы электроэнергетических систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. - Новосибирск, 2013. - 154 с.

70. Lei W., Jiaojiao W., Tian Y., Xiaoning H., Fushou X., Yanzhong L. Film boiling heat transfer prediction of liquid nitrogen from different geometry heaters // International Journal of Multiphase Flow, 2020, vol. 129, Art. no. 103294.

71. Hu M., Zhou Q.B., Wang X., Tang F.P., Sheng J., Bian X.Y., Jin Z.J. Study of Liquid Nitrogen Insulation Characteristics for Superconducting Transformers // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, vol. 32, no. 4, pp. 1-5, Art. no. 5500305.

72. Zhou J., Chan W., Schwartz J. Quench Detection Criteria for YBa₂Cu₃O_{7-δ} Coils Monitored via a Distributed Temperature Sensor for 77 K Cases // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, vol. 28, no. 5, Art. no. 4703012.

73. НЛМК, каталог продукции [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://optomkabel.ru/d/transformatornyy-prokat.pdf> (дата обращения: 23.11.2023).

74. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Издательство: Л.: Энергоатомиздат., Год: 1986 - 3-е изд., перераб. и доп., - 488 с.

75. Bae, J. H., Park, H. Y., Eom, B. Y., Seong, K. C., & Baik, S. K. Thermal stability of YBCO coated conductor with different Cu stabilizer thickness // Physica C: Superconductivity and Its Applications. – 2010. - Vol. 470, - No. 20, - P. 1880-1892.

76. Hu, D., Zhang, J. W., Zhao, A. F., He, Y. W., Xi, D. M., Huang, H., ... Jin, Z. Influence of the Substrate Layer on the Lightning Current Performance of YBa₂Cu₃O_{7-δ} Tapes // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2017. - Vol. 30. – No. 10. – P. 2717-2725.

77. Кожевников И. Г., Новицкий Л. А. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Издательство: Машиностроение., Год: 1982, - 328 с.
78. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.1/Под ред. Ю. В. Корицкого и др. — 3-е изд перераб. — М.: Энергоатомиздат, 1986.— 368 с.
79. Elshiekh M., Zhang M., Ravindra H., Chen X., Venuturumilli S., Huang X., Schoder K., Steurer M., Yuan W. Effectiveness of Superconducting Fault Current Limiting Transformers in Power Systems // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, vol. 28, no. 3, Art. no. 5601607.
80. Ivanov D. M. Experimental Studies of a High-temperature Superconducting Prototype Transformer with Current Limiting Function / Ivanov D. M., V. Z. Manusov, A. V. Semenov // 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE): proc. Moscow, Russia. - 12-14 March 2020. – P. 1-5.
81. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
82. James H.P. Rice , Dominic A. Moseley , Alexander Petrov , et. al. Current-Sharing Behaviour of Single-Phase HTS Transformers With Stacked-Tape Cables // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2024, vol. 34, no. 3, Art. no. 5500105.
83. Yazdani-Asrami M., Sadeghi A., Shahin A.B., Song W. Short circuit analysis of a fault-tolerant current-limiting high temperature superconducting transformer in a power system in presence of distributed generations // Superconductivity, 2024, vol. 9, Art. no. 100085.
84. Xu M., et al., “Generalized critical-state model for hard superconductors,” Phys. Rev. B., vol.42, № 16, pp. 10773-10776, 1990.
85. Algarni R., et al., “Enhanced critical current density and flux pinning traits with Dy₂O₃ nanoparticles added to YBa₂Cu₃O_{7-d} superconductor,” Journal of Alloys and Compounds, Vol. 852, 157019., 2021.

86. Komarzyniec G. Impact of the voltage phase angle at the time of switching on the HTS transformer on the loss of winding superconductivity // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, 2020, no. 2, pp. 48-51.
87. Song W., et al., "AC loss simulation in a HTS 3-Phase 1 MVA transformer using H formulation," Cryogenics, Vol. 94, pp. 14-21, 2018.
88. Ghabeli A., et al., "Optimization of Distributive Ratios of Apportioned Winding Configuration in HTS Power Transformers for Hysteresis Loss and Leakage Flux Reduction," Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, Vol. 28, № 12, pp. 3463-3479, 2015.
89. Zubko V. V., Fetisov S. S., & Vysotsky V. S., "Hysteresis Losses Analysis in 2G HTS Cables," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, № 3, pp. 1-5, 2016.
90. Shen B., et al., "Review of the AC loss computation for HTS using H formulation," Superconductor Science and Technology, Vol. 33, № 3, p. 033002, 2020.
91. Berger A., et al., "Comparison of the efficiency of superconducting and conventional transformers," Journal of Physics: Conference Series, Vol. 234, p. 032004, 2010.
92. Grilli F. and Ashworth S., "Measuring transport AC losses in YBCO-coated conductor coils," Superconductor Science and Technology, Vol. 20, pp. 794-799, 2007.
93. Levin G. A., et al., "AC Losses of Copper Stabilized Multifilament YBCO Coated Conductors," IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 23, № 3, pp. 1-5, 2012.
94. Nguyen D.N., et al., "Numerical calculations of the total ac loss of Cu-stabilized $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductor with a ferromagnetic substrate," Journal of Applied Physics, Vol. 101, p. 053905, 2007.
95. Manusov V.Z., Semenov A.V., Kriukov D.O., "Computational and experimental study of air-core HTS transformer electrothermal behavior at current limiting mode," International Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 11, № 1, pp. 155-162, 2021.

96. 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

97. 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.

98. E. P. Volkov [et al.] The first in Russia HTSC transformer 1 MVA, 10/0,4 kV // Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 63. – P. 909-916.

99. СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. - Введ. 28-08-2017.- М., 2017.- 357 с.

100. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / Под ред. Л.А. Жукова. – М., Энергия, 1979. – 456 с., ил.

101. Манусов В. З. Ограничение токов короткого замыкания с помощью трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками / Манусов В. З., Александров Н. В. //Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – №. 4. – С 100-105.

102. Волков Э.П. Первый в России ВТСП трансформатор 1 МВА, 10/0,4 кВ / Волков Э.П., Джафаров Э.А., Флейшман Л.С., Высоцкий В.С., Суконкин В.В и др. // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2016. – №. 5. – С. 45-56.

103. Веников В.А. Переходные процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1978. – 415 с.

104. Манусов В.З., Александров Н.В. Влияние сверхпроводящих трансформаторов на устойчивость электроэнергетической системы // Научный вестник НГТУ. – 2013. – №3. – С. 160-165.

105. S. Kopylov, N. Balashov, et. all. Use of Superconducting Devices Operating Together to Ensure the Dynamic Stability of Electric Power System // IEEE transactions on applied superconductivity. - 2011. - Vol. 21. — No. 3. — P. 1-5

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ООО

«ИНПЭС»

Д.В. Гладких

04 2025 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Д.М. Иванова «Моделирование и анализ переходных процессов при ограничении тока короткого замыкания в электроэнергетической системе с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором»

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов диссертационной работы Иванова Д.М.

Предложенные в диссертации математическая модель расчета переходных процессов и способ ограничения ударного тока короткого замыкания могут быть использованы при проектировании распределительных электрических сетей класса напряжения 6-10 кВ с целью снижения уровней токов трехфазных и двухфазных коротких замыканий. Разработанные практические рекомендации по конструкциям и режимам высокотемпературных сверхпроводящих трансформаторов могут быть использованы для выполнения НИОКР по созданию опытных и промышленных образцов высокотемпературных сверхпроводящих трансформаторов.

В связи с вышеизложенным, диссертационная работа Д.М. Иванова весьма актуальна, а внедрение ее результатов позволяет обеспечить эффективное ограничение ударных токов коротких замыканий и повысить надежность и устойчивость функционирования электроэнергетических систем.

Заместитель генерального директора –
директор департамента
развития энергетических систем

Котиков Е.С.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Д.М. Иванова в учебный процесс института Инженерных и цифровых технологий
Сибирского государственного университета водного транспорта

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Д.М. Иванова на тему «Моделирование и анализ переходных процессов при ограничении тока короткого замыкания в электроэнергетической системе с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором», внедрены в учебный процесс института Инженерных и цифровых технологий, кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника» для проведения практических занятий и лабораторных работ по следующим дисциплинам очной и заочной форм обучения:

1. «Переходные процессы в электроэнергетических системах», «Электроэнергетические системы и сети» для подготовки бакалавров, обучающихся по специальности 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника;
2. «Теория и практика инженерного исследования», «Электроэнергетические комплексы» для подготовки магистров, обучающихся по специальности 13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника.
3. «Электроэнергетика» для подготовки кадров высшей квалификации по направлению подготовки 13.06.01 – Электро- и теплотехника.

Использование результатов диссертационной работы, полученные Д.М. Ивановым, позволяют повысить качество изучения вышеуказанных дисциплин с учетом современных научных и практических требований.

Заведующий кафедрой
«Электроэнергетические системы и
электротехника», д.т.н., профессор

 С.В. Горелов

Начальник отдела аспирантуры и
докторантуры, к.т.н., доцент

 О.В. Рослякова

Доцент кафедры «Электроэнергетические
системы и электротехника», к.т.н.

 Л.В. Садовская

Қазақстан Республикасы
"Павлодарэнергоэкспертиза" ЖШС

Республика Казахстан
ТОО "Павлодарэнергоэкспертиза"

140011, Павлодар қ-ы
Қатаев көшесі, 13-1
Тел.: (7182) 54-55-40, 54-54-38

140011, г. Павлодар
Ул. Қатаева, 13-1
Тел.: (7182) 54-55-40, 54-54-38

УТВЕРЖДАЮ

Директор ТОО

«Павлодарэнергоэкспертиза»

Пархоменко

04 2025 г.



АКТ

о практическом использовании результатов диссертационной работы Д.М. Иванова «Моделирование и анализ переходных процессов при ограничении тока короткого замыкания в электроэнергетической системе с высокотемпературным сверхпроводящим трансформатором».

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Иванова Д.М., представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, касающиеся способов ограничения тока короткого замыкания, могут быть использованы при координации и снижении уровней токов трехфазных и двухфазных коротких замыканий в электрических сетях класса напряжений 6-10 кВ. Предложенные в диссертации метод и модели, могут быть использованы при расчете электромагнитных, электромеханических и тепловых переходных процессов, возникающих при коротких замыканиях, а также при оценке их влияния на электрооборудование распределительных электрических сетей.

Внедрение полученных результатов позволит решить проблемы ограничения токов короткого замыкания и повышения энергоэффективности электрических сетей в краткосрочной перспективе.

Диссертационная работа Иванова Д.М., в связи с вышеизложенным, весьма актуальна и ее результаты используются в практической деятельности ТОО «Павлодарэнергоэкспертиза».

Главный инженер

К.В.Зыков

