

На правах рукописи



АЛЕКСАНДРОВ Николай Васильевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ НА РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

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

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

Официальные оппоненты: **Сальников Василий Герасимович**
доктор технических наук, профессор,
Новосибирская государственная академия
водного транспорта, профессор кафедры
«Электроэнергетические системы и
электротехника»

Михеев Павел Александрович
кандидат технических наук,
начальник аналитического отдела ОАО
Новосибирскэнергосбыт, г. Новосибирск

Ведущая организация: Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, г. Томск

Защита состоится 24 апреля 2014 г. 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «28» февраля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



И.П. Тимофеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие электроэнергетических систем (ЭЭС) требует повышения их энергоэффективности и технического совершенствования. Традиционные силовые трансформаторы имеют достаточно высокий коэффициент полезного действия (КПД), однако, увеличение стоимости электроэнергии, вследствие увеличения стоимости топлива, стимулирует интенсивные поиски путей снижения потерь в ЭЭС, в том числе и в силовых трансформаторах, потери в которых составляют около половины потерь при передаче и распределении электроэнергии. В то же время в Российской Федерации (РФ) сосредоточены одни из самых больших трансформаторных мощностей в мире. Это связано с тем, что в РФ вследствие больших расстояний между источниками генерации и потребителями имеет место многоступенчатая система повышения и понижения напряжения (1 кВ, 6 кВ, 10 кВ, 35 кВ, 110 кВ, 220 кВ, 330 кВ, 500 кВ, 750 кВ), которая приводит к большим потерям электроэнергии. К тому же, около 75 % трансформаторов выработали свой эксплуатационный срок службы, что также сказывается на величине потерь и эксплуатационных затратах. В настоящее время потери энергии в электрических сетях недопустимо высоки. Применяемое для охлаждения устройств в электроэнергетике трансформаторное масло – материал огнеопасный и загрязняет окружающую среду, приемлемые потери энергии на переменном токе у высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) обеспечивают значительное увеличение эффективности работы электроэнергетических устройств, а охлаждение жидким азотом отличается экологической чистотой и безопасностью.

В свете вышесказанного актуально использование силовых трансформаторов со сверхпроводниковыми (СП) обмотками на основе высокотемпературных сверхпроводников с рабочей температурой 65-77 К, главным преимуществом которых являются низкие нагрузочные потери по сравнению с традиционными трансформаторами. Помимо этого, сверхпроводниковые трансформаторы обладают такими преимуществами как меньшие массогабаритные показатели, возможность ограничения токов короткого замыкания, экологическая безопасность, пожаровзрывобезопасность и др.

Разработка сверхпроводниковых трансформаторов (СПТ) ведется с 1960-х гг. в нашей стране и за рубежом еще на технологии низкотемпературной сверхпроводимости (НТСП) с рабочей температурой 4,2-12 К. Использованию сверхпроводниковых трансформаторов посвящены работы Ш.И. Лутидзе, Э.А. Джафарова, Э.П. Волкова и др. В целом, применению устройств с использованием явления сверхпроводимости посвящены работы К.В. Илюшина, И.В. Якимца, С.И. Копылова, В.А. Альтова, В.З. Манусова, П.А. Михеева и др.

Необходимо отметить, что работ, посвященных влиянию СПТ на электроэнергетическую систему крайне мало. И, в этой связи, необходимо рассмотреть влияние сверхпроводниковых трансформаторов на электроэнергетическую систему в нормальных и аварийных режимах работы.

Основной целью диссертационной работы является исследование преимуществ от применения сверхпроводниковых трансформаторов и их влияние на электроэнергетическую систему с технической и экономической точек зрения.

Для достижения основной цели исследования поставлены следующие задачи:

- уточнение параметров схемы замещения сверхпроводниковых трансформаторов в установившихся и переходных режимах;
- разработка математической модели электромагнитных переходных процессов при наличии в электрической сети сверхпроводниковых трансформаторов;
- оценка влияния сверхпроводниковых трансформаторов на электромеханические переходные процессы;
- оценка экономической эффективности и целесообразности применения сверхпроводниковых трансформаторов в ЭЭС.

Объектом исследования являются сверхпроводниковые трансформаторы и их параметры (сопротивления в различных режимах работы, потери).

Предметом исследования являются установившиеся режимы, а также электромагнитные и электромеханические переходные процессы в ЭЭС при использовании в них сверхпроводниковых трансформаторов.

Методы исследования. Решение поставленных задач базируется на выводах фундаментальных и прикладных наук, таких как электромагнетизм, электротехника, математический анализ, математическое моделирование и др.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- уточнена схема замещения и расчет электрических параметров сверхпроводниковых трансформаторов, что позволяет учесть его отличительные особенности при исследовании режимов в ЭЭС;
- разработана адекватная математическая модель сверхпроводниковых трансформаторов, позволяющая описывать электромагнитные процессы при коротком замыкании (КЗ) в электрической сети;
- определен критерий возврата сверхпроводниковых трансформаторов в сверхпроводящее состояние после окончания процесса ограничения тока КЗ;
- предложена гибридная обмотка, позволяющая улучшить условия возврата сверхпроводниковых трансформаторов в сверхпроводящее состояние и ограничить токи КЗ с необходимой глубиной;
- впервые выполнено исследование влияния сверхпроводниковых трансформаторов на электромеханические переходные процессы в ЭЭС с позиции возврата сверхпроводниковых трансформаторов в сверхпроводящее состояние;
- показано положительное влияние сверхпроводниковых трансформаторов на уровень напряжения в узлах электрической сети ЭЭС.

Практическая значимость результатов работы. Выполненные в диссертационной работе исследования позволили получить следующие результаты:

- выявлено влияние сверхпроводниковых трансформаторов на электромагнитные и электромеханические переходные процессы;
- сформулированы требования к параметрам сверхпроводниковых трансформаторов с позиции ограничения токов КЗ и возврата в сверхпроводящее состояние;

- разработан алгоритм и его программная реализация для расчета процессов перехода в нормальное состояние и возврата в сверхпроводящее состояние ВТСП проводов второго поколения;

- дана экономическая оценка целесообразности использования сверхпроводниковых трансформаторов в ЭЭС с учетом современных и прогнозируемых цен на ВТСП материалы;

- получен патент на полезную модель, позволяющий одновременно использовать обмотку сверхпроводниковых трансформаторов в качестве гибридной токоограничивающей обмотки.

Основные положения, выносимые на защиту:

- математическая модель сверхпроводниковых трансформаторов, позволяющая моделировать инерционность изменения сопротивления устройства при электромагнитном переходном процессе;

- анализ влияния сверхпроводниковых трансформаторов на электромеханические переходные процессы при различных параметрах устройств и структуре сети;

- комплексный критерий к параметрам сверхпроводниковых трансформаторов и местам их установки в целях одновременного удовлетворения условиям успешного токоограничения, успешного возврата в сверхпроводящее состояние и устойчивости питаемой нагрузки;

- обоснование экономически целесообразной стоимости сверхпроводниковых трансформаторов в актуальных ценах.

Достоверность результатов работы подтверждается:

- достаточно полным анализом отечественной и зарубежной практики разработки различных типов и параметров сверхпроводниковых трансформаторов;

- сопоставлением результатов вычислений мгновенных значений токов и теплового действия этих токов, полученных при применении предложенной модели сверхпроводниковых трансформаторов с осциллограммами, полученными экспериментально в ходе испытаний сверхпроводниковых трансформаторов разными исследовательскими группами;

- фактическими и прогнозируемыми ценами на электрическую энергию и электрическое оборудование по состоянию на 2013 г.

Апробация результатов работы. Отдельные результаты исследования докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Системы электрообеспечения предприятий» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), на конференции «Современные техника и технологии» (НИ ТПУ, г.Томск, 2011, 2012, 2013 гг.), на всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука, технологии, инновации» в 2012 г. в г. Новосибирске, «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования» (НИ ТПУ, г.Томск, 2012 г.), на Днях Науки НГТУ в 2012, 2013 гг., на семинаре «Методы и проблемы диссертации» (НГТУ, г Новосибирск, 2013 г.), на 13-ой международной конференции по окружающей среде и электроэнергетике (EEEIC'13, Wroclaw, Poland, 2013). Предложенный методический подход использован в учебном процессе: введен в качестве самостоятельного раздела в курс

«Производство электроэнергии» на кафедре «Электрические станции» НГТУ, что подтверждается актом о внедрении.

Публикации. Всего опубликованных по теме диссертации 11 работ, из которых 3 научные статьи, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ; 1 патент РФ на полезную модель, 7 публикаций в материалах международных и всероссийских конференций.

Личный вклад соискателя. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит формализация поставленных задач, разработка математических моделей и методов, реализация алгоритмов в программно-вычислительных комплексах, обобщение и анализ результатов.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованных источников, включающего 87 наименований, и приложений. Объём работы составляет 145 страниц основного текста, включая 84 рисунка и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложена общая характеристика работы, показана её актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, основные положения научной новизны, отражена практическая ценность результатов и её достоверность, описана структура диссертации в целом.

В **первом разделе** рассмотрено современное положение разработок электроэнергетических устройств с использованием сверхпроводимости. Дан краткий очерк развития теории сверхпроводимости, описаны основные свойства сверхпроводимости. Приведены разработанные и разрабатываемые сверхпроводниковые электроэнергетические устройства такие как генераторы, кабельные линии, трансформаторы, ограничители токов КЗ, сверхпроводниковые накопители энергии, двигатели, и основные центры их исследования. Детально описаны сверхпроводниковые трансформаторы. Рассмотрены современные токонесущие элементы на основе ВТСП материалов (рисунок 1) и их свойства.

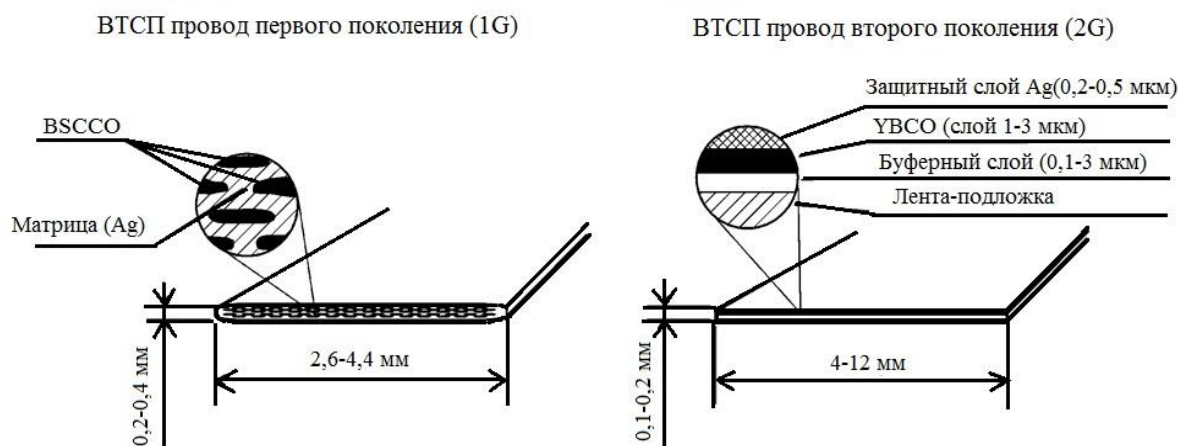


Рисунок 1 – Сечение ВТСП лент первого и второго поколений

Также рассмотрены криогенные устройства для охлаждения сверхпроводниковых электроэнергетических устройств.

Во **втором разделе** рассмотрены стационарные режимы работы сверхпроводниковых трансформаторов. В первой части главы определено, что уменьшение индуктивного сопротивления СПТ относительно индуктивного сопротивления обычного трансформатора в предположении равенства числа витков обмоток, поперечного сечения стержня магнитопровода и высоты витка обмотки пропорционально увеличению плотности тока в обмотках трансформатора

$$\frac{X_{T.M}}{X_{T.СП}} \sim k = \frac{j_{СП}}{j_M}, \quad (1)$$

где $X_{T.M}$ и $X_{T.СП}$ – индуктивное сопротивление трансформатора с медными обмотками и СПТ соответственно; $j_{СП}$ и j_M – плотность тока в СП и медных обмотках соответственно.

Для сравнительного анализа построены упрощенные векторные диаграммы (рисунок 2). Построены внешние характеристики и изменение напряжение в зависимости от нагрузки для обычного и СП трансформаторов (рисунок 3), из которых видно, что в случае с СПТ повышается уровень напряжения, напряжение на вторичной стороне подвержено меньшему изменению при изменении нагрузки.

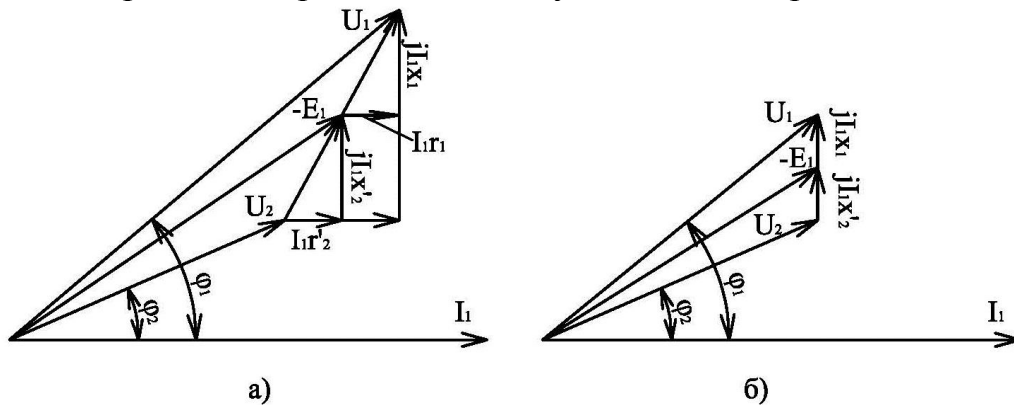


Рисунок 2 – Упрощенные векторные диаграммы обычного трансформатора(а) и СПТ(б)

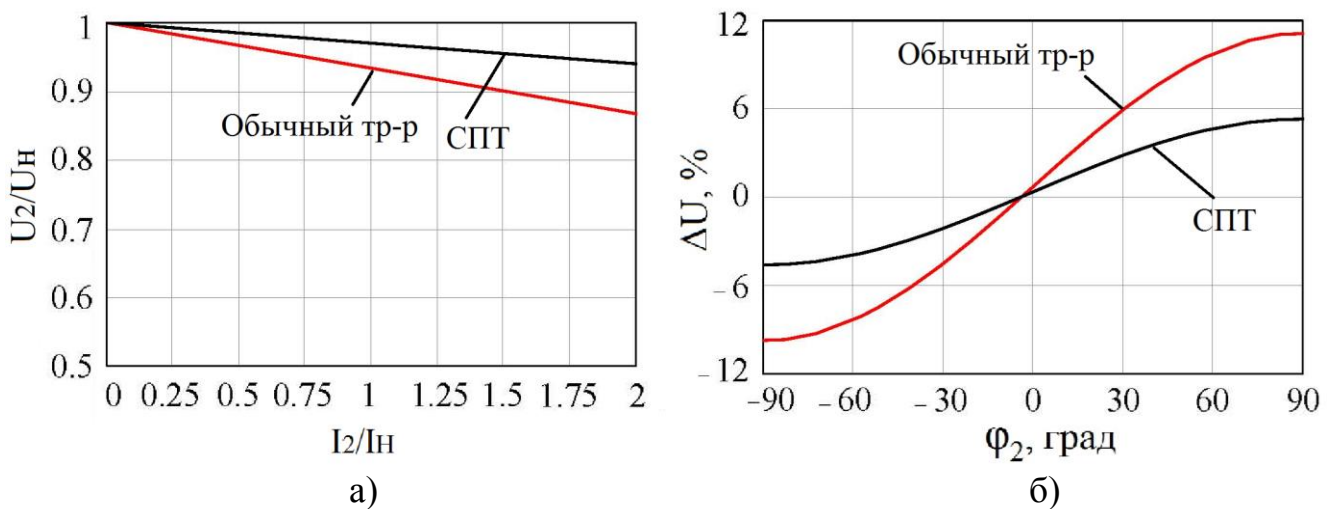


Рисунок 3 – Внешние характеристики (а) и изменение напряжения в зависимости от характера нагрузки (б) для обычного трансформатора и СПТ

Далее рассмотрены потери в СПТ, механизмы их возникновения. Представлено, что параллельная работа СПТ и обычного трансформатора невозможна, т.к. они обладают различными значениями напряжений короткого замыкания. Целесообразнее при замене на подстанции одного из двух трансформаторов на СПТ включенным оставлять СПТ по причине того, что он обладает большой перегрузочной способностью без старения изоляции и меньшими потерями по сравнению с двумя традиционными трансформаторами. На рисунке 4 приведены зависимости потерь в обычных и сверхпроводниковых трансформаторах от нагрузки.

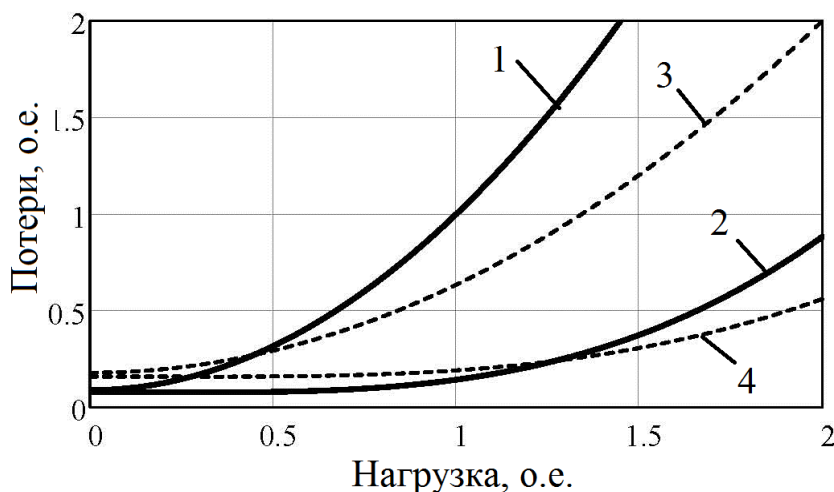


Рисунок 4 – Потери в обычном и СП трансформаторах: 1 – обычный трансформатор; 2 – СПТ; 3 – два обычных трансформатора; 4 – два СПТ

Как видно из рисунка 4 потери в одном СПТ могут быть меньше чем в двух обычных трансформаторах при одинаковой нагрузке.

Проведен сравнительный анализ габаритных показателей СПТ и обычного трансформатора в зависимости от напряжения витка обмотки, который показал, что массогабаритные показатели СПТ снижаются примерно вдвое (рисунок 5).

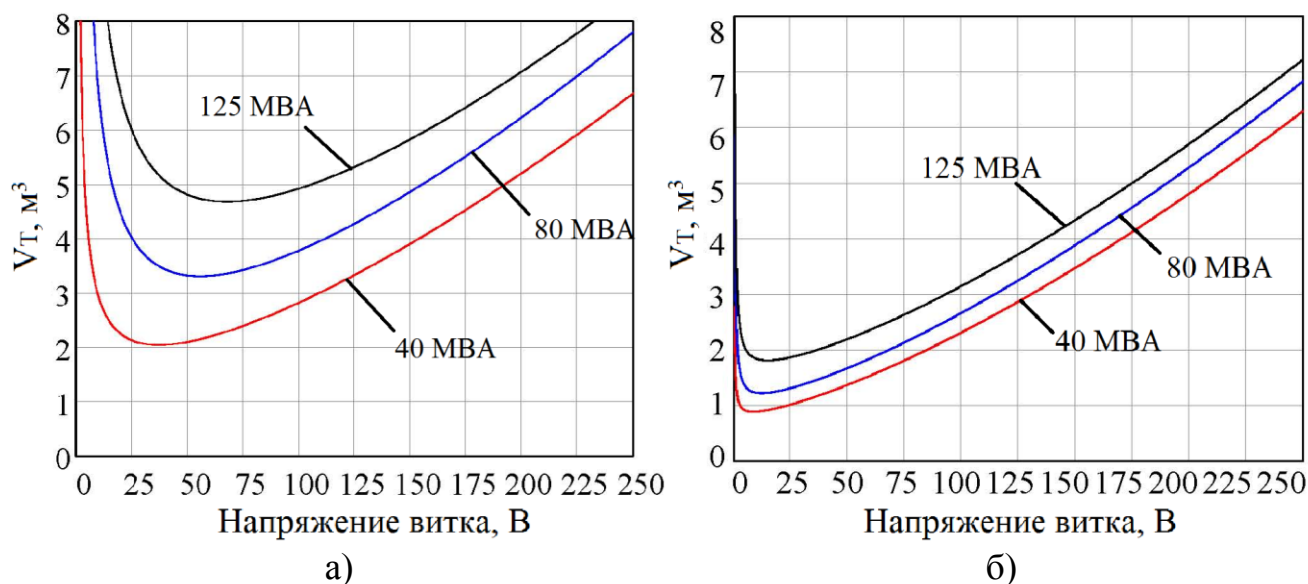


Рисунок 5 – Зависимость объема активной части обычного трансформатора (а) и СПТ (б) от ЭДС витка

Проведенный численный расчет нагрузочного режима электрической сети для случаев использования СПТ и обычного трансформатора показал существенное снижение потерь в сети в первом случае, увеличение уровня реактивной мощности и, как следствие, повышение уровня напряжения.

В третьем разделе исследуется влияние СПТ на электромагнитные переходные процессы. Было проведено исследование процессов перехода ВТСП провода второго поколения в нормальное (несверхпроводящее) состояние при возникновении КЗ и последующего возврата в СП состояние после устранения КЗ с учетом разных режимов кипения жидкого азота. Уравнение теплопроводности, описывающее тепловые процессы в СПТ, выглядит следующим образом

$$C \frac{dT(I,T)}{dt} = Q(I,T) - Aq(T), \quad (2)$$

где C - полная теплоемкость обмотки; T - температура; I - ток; A - площадь поверхности охлаждения обмотки; q - плотность теплового потока, отводимого в жидкий азот с поверхности обмотки.

Разработан программный код для расчета процессов перехода в нормальное состояние и возврата в СП состояние. Расчет производился для ВТСП проводов второго поколения производства фирмы SuperPower Inc (США). На рисунке 6 показано активное сопротивление ВТСП проводов при разных условиях. Изменение температуры провода фактически имеет тот же вид.

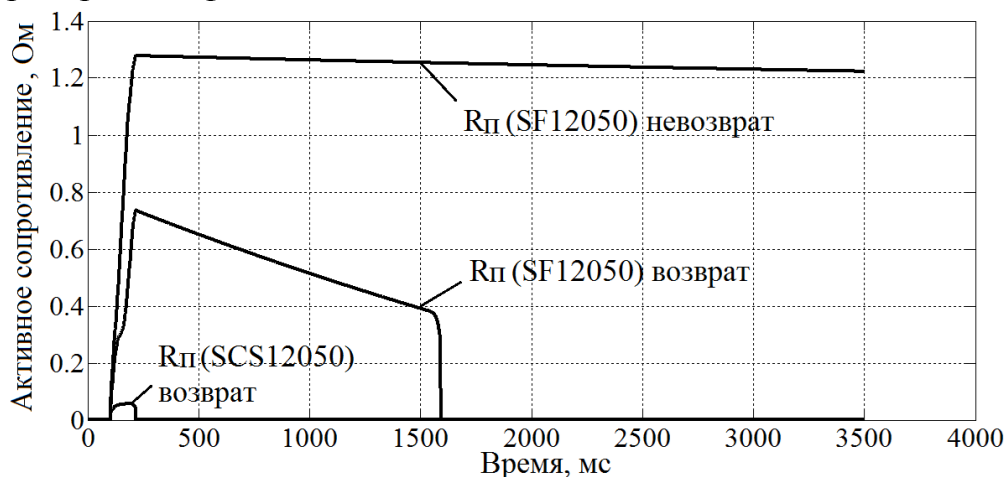


Рисунок 6 – Активное сопротивление провода во время и после устранения КЗ

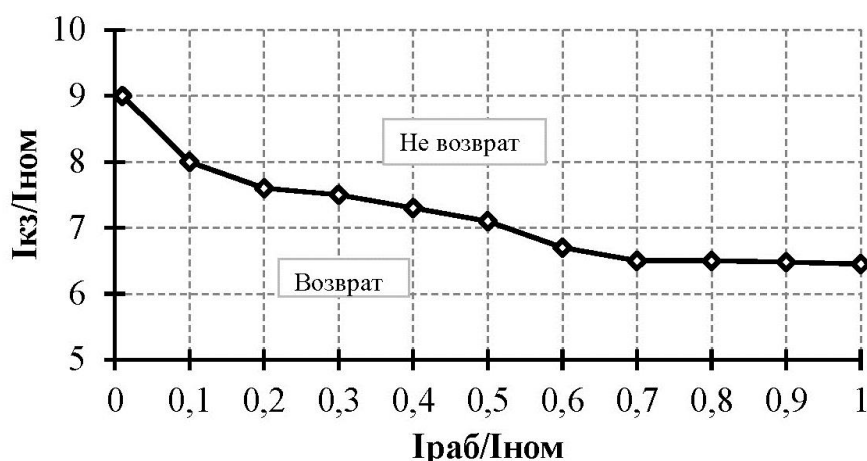


Рисунок 7 – Критерий возврата обмотки в СП состояние после устранения КЗ

Как видно из рисунка 6, временная зависимость активного сопротивления ВТСП провода имеет резко нелинейный вид.

В ходе исследования был определен критерий возврата ВТСП провода на основе соотношений величин тока КЗ и нагрузочного тока после устранения КЗ (рисунок 7).

Предложена общая математическая модель токоограничения с помощью СПТ, основанная на решении нестационарного уравнения теплопроводности (2) и дифференциального уравнения тока короткого замыкания

$$\left\{ \begin{array}{ll} R_T = 0 & I < I_k - \text{СП состояние сопротивление равно нулю;} \\ R_T = \frac{R_{nc}(T) \cdot R_{сп}(T)}{R_{nc}(T) + R_{сп}(T)} & I_k \leq I < I_{mo} - \text{переход в нормальное состояние;} \\ R_T = R_{nc}(T) & I \geq I_{mo} - \text{токоограничивающее действие;} \\ R_T = f(T) & I = 0 - \text{возврат в СП состояние после отключения КЗ.} \end{array} \right. \quad (3)$$

В выражении (3) R_T - активное сопротивление трансформатора, R_{nc} - активное сопротивление несверхпроводящих слоев ВТСП провода; $R_{сп}$ - активное сопротивление сверхпроводящих слоев ВТСП провода.

Алгоритм расчета процессов, протекающих при КЗ и после его устранения, и его программная реализация здесь не приводятся из-за большого объема выкладок.

В целях упрощения представления активного сопротивления и расчета электрической цепи во время КЗ и после устранения КЗ предлагается задавать его некоторой элементарной функцией, например, экспоненциальной

$$R_T = R_{T,КЗ} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}), \quad (4)$$

$$R_T = R_{T,КЗ} e^{-\frac{t}{\tau_2}}, \quad (5)$$

где $R_{T,КЗ}$ – активное сопротивление трансформатора на момент устранения КЗ; τ_1 – постоянная времени роста активного сопротивления во время КЗ; τ_2 – постоянная времени снижения активного сопротивления в процессе возврата СПТ.

Значение τ_1 в основном зависит от величины тока КЗ, поперечного сечения провода и находится в диапазоне 0,05–0,1с. Постоянная времени τ_2 зависит от режима кипения жидкого азота, величины послеаварийного тока и лежит в диапазоне 1–2с для случая возврата СП обмотки в СП состояние. Далее на рисунке 8 приводятся кривые токов КЗ для случаев использования обычного и ВТСП проводов. Расчет токов производился в программно-вычислительном комплексе АТР ЕМТР.

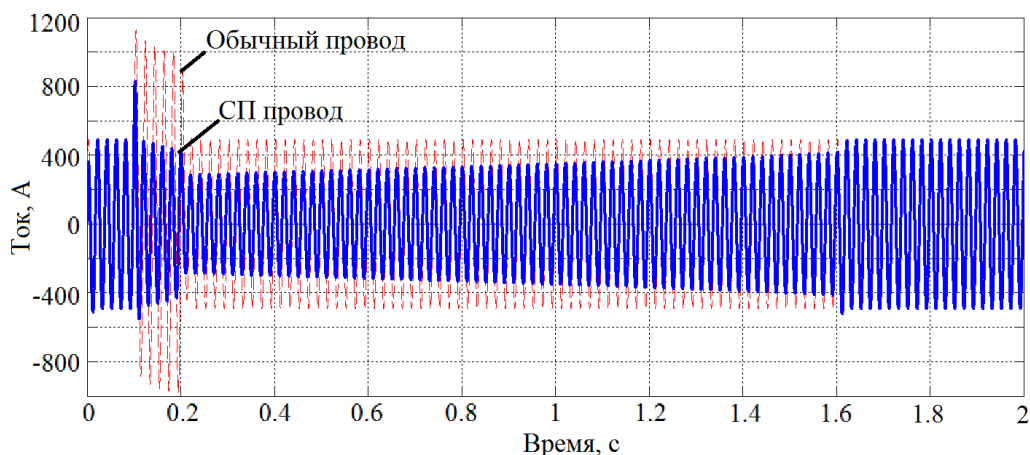


Рисунок 8 – Кривые токов КЗ для обычного трансформатора и для СПТ

Как видно из рисунка 8 ток КЗ ограничивается в случае использования СП проводов. Используя значения токов КЗ с ограничением и без ограничения, вводится понятие коэффициента ограничения тока КЗ

$$k_{огр} = \frac{i_{огр}}{i_{без.огр}}. \quad (6)$$

Далее определялась возможность ограничения тока КЗ с помощью СПТ с позиции обеспечения сопротивления требуемой величины. Произведенный приближенный расчет СПТ с использованием серийно выпускаемых ВТСП проводов, показал, что ток КЗ может быть ограничен с необходимой глубиной. Была предложена гибридная обмотка, в которой присутствует токоограничивающая и нетокоограничивающая части.

Проводился сравнительный анализ величин бросков тока намагничивания при включении трансформатора. Показано, что в случае с СПТ величина броска тока при включении трансформатора больше, чем в случае с обычным трансформатором, поэтому необходимы меры по их снижению.

В четвертом разделе исследуется влияние СПТ на электромеханические переходные процессы. Исследовались схемы сетей, приведенных на рисунке 9.

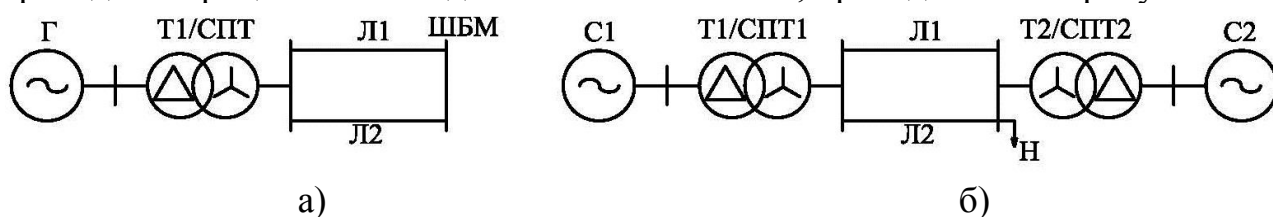


Рисунок 9 – Простейшая электропередача «генератор – ШБМ» (а) и две электростанции соизмеримой мощности (б)

Статическая устойчивость улучшается, т.к. увеличивается предел передаваемой мощности. На рисунке 10 показана зависимость отношения максимумов мощностей от степени снижения сопротивления трансформатора для случая установки СПТ в блоке с генератором, работающим на шины бесконечной мощности (кривая 1), и для случая установки СПТ между электростанциями соизмеримой мощности (кривая 2). Из рисунка 10 видно, что СПТ увеличивают предел передаваемой мощности до 20% в случае установки между двумя электростанциями соизмеримой мощности.

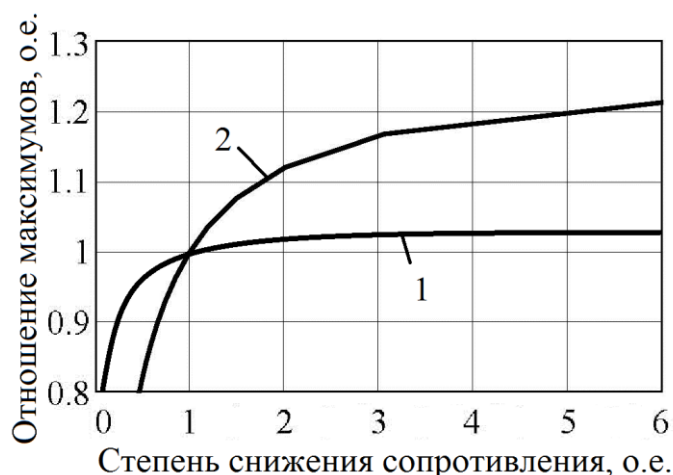


Рисунок 10 – Зависимость отношения $P_{max.СПТ}/P_{max}$ от $X_T/X_{СПТ}$

Далее исследуется влияние СПТ на динамическую устойчивость для схемы, приведенной на рисунке 9,а. При их использовании появляющееся продольное активное сопротивление в момент КЗ ограничивает ток КЗ и компенсирует сброс

мощности генератора, вследствие чего ротор генератора ускоряется в меньшей степени, и, более того, при больших значениях активного сопротивления может затормозиться. На рисунке 11 показаны угловые характеристики мощности в случае использования СПТ при малых значениях активного сопротивления, для которых амплитуда аварийной характеристики мощности гораздо меньше амплитуды рабочей характеристики.

Одновременно с этим площадка ускорения *abвгд* оказывается меньшей, чем в случае использования обычного трансформатора. Причем это обстоятельство сопровождается увеличением площадки торможения за счет того что СПТ не успевает мгновенно вернуться в сверхпроводящее состояние и оставшееся активное сопротивление приподнимает характеристику мощности.

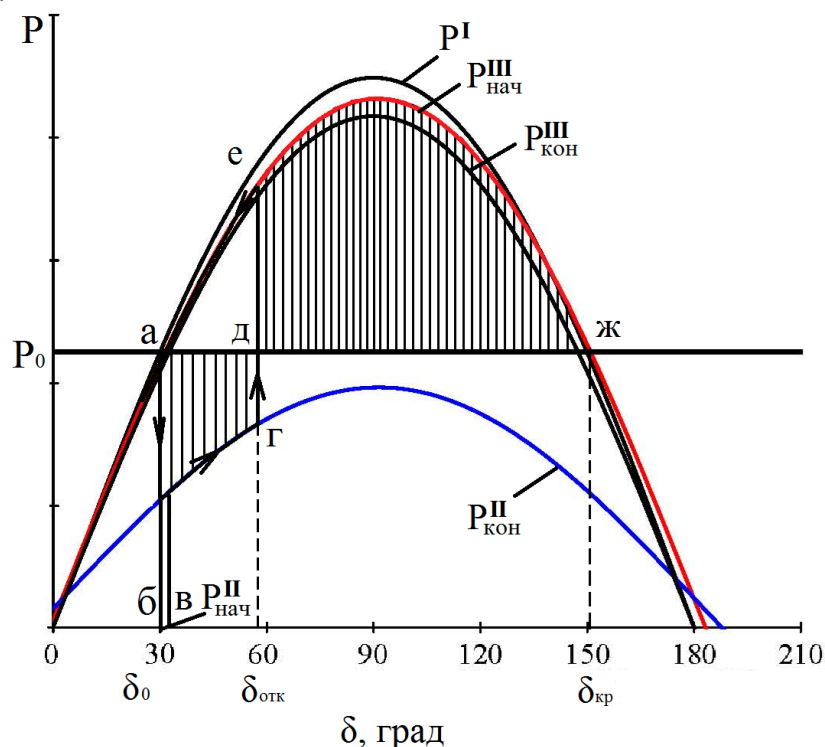


Рисунок 11 – Угловые характеристики мощности в случае использования СПТ при малых значениях активного сопротивления

С учетом этого критерием улучшения динамической устойчивости может выступать факт увеличения времени предельного отключения. Предельный угол отключения определяется исходя из условия предельного равенства площадок ускорения и торможения

$$\delta_{отк.пред} = \arccos \left[\frac{P_0(\delta_{кр} - \delta_0) + P_{макс}^{III} \cos \delta_{кр} - P_{макс}^{II} \cos \delta_0}{P_{макс}^{III} - P_{макс}^{II}} \right]. \quad (7)$$

При использовании СПТ время предельного отключения больше времени предельного отключения в случае с обычным трансформатором

$$\sqrt{\frac{2T_j(\delta_{отк.пред}^{СПТ} - \delta_0^{СПТ})}{P_0}} > \sqrt{\frac{2T_j(\delta_{отк.пред} - \delta_0)}{P_0}}, \quad (8)$$

или

$$\delta_{отк.пред}^{СПТ} - \delta_{отк.пред} > \delta_0^{СПТ} - \delta_0. \quad (9)$$

Обозначим левую часть неравенства как $\Delta\delta_{отк.пред}$, а правую как $\Delta\delta_0$. Тогда критерий улучшения динамической устойчивости выглядит следующим образом

$$\Delta\delta_{отк.пред} > \Delta\delta_0. \quad (10)$$

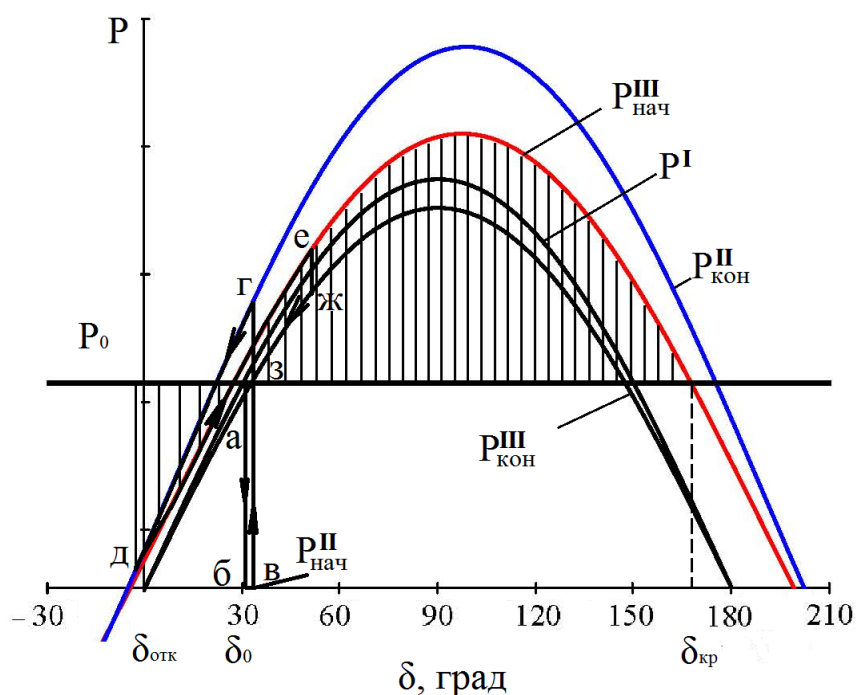


Рисунок 12 – Угловые характеристики мощности в случае использования СПТ при больших значениях активного сопротивления

Когда во время КЗ появляется активное сопротивление большой величины (см. рисунок 12) аварийная характеристика мощности соизмерима с рабочей характеристикой. Исходный режим работы характеризуется точкой *a*, при возникновении КЗ вначале мощность генератора падает (точка *б* на характеристике $P^{\text{II}}_{\text{нач}}$), но с ростом активного сопротивления мощность выдаваемая генератором увеличивается (характеристика $P^{\text{II}}_{\text{кон}}$).

Однако вследствие чрезмерно большой величины активного сопротивления ротор генератора тормозится, и генератор может выпасть из синхронизма. Стоит отметить, что при мгновенном начале токоограничивающего действия СПТ характеристика $P^{\text{II}}_{\text{нач}}$ (точки *б* и *в*) исключаются из рассмотрения.

При некотором значении активного сопротивления $R_{\text{ОПТ}}$ аварийная характеристика мощности будет близка к доаварийной, что вызовет минимальные колебания угла δ . Нужно отметить, что длительный режим работы в состоянии невозврата СПТ неэкономичен по причине больших потерь. Кроме того, возникают опасения чрезмерных колебаний угла и мощности при возврате СПТ в СП состояние.

В конце раздела приводится более подробное исследование электромеханических переходных процессов с помощью программно-вычислительных комплексов Mustang и АТР ЕМТР, производится расчет электрической сети, приведенной на рисунке 9,а с параметрами, приведенными в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры сети

Генератор	$S_{\text{НОМ}} = 235 \text{ МВА}, X'_d = 0,295 \text{ о.е.}, X_d = 1,7, T_j = 7,4 \text{ с}$
Трансформатор	$S_{\text{НОМ}} = 250 \text{ МВА}, U_{\text{ВН}} = 242 \text{ кВ}, u_k = 11\%, \Delta P_k = 600 \text{ кВт}$
СПТ	$S_{\text{НОМ}} = 250 \text{ МВА}, U_{\text{ВН}} = 242 \text{ кВ}, u_k = 3\%$
Линия	$L = 150 \text{ км}, r_{\text{уд}} = 0,121 \text{ Ом/км}, x_{\text{уд}} = 0,435 \text{ Ом/км}$

Предполагается, что КЗ происходит в начале линии, которое устраняется через 0,1 с. Характер изменения активного сопротивления задавался в соответ-

ствии с рисунком 6. На рисунке 13 показаны колебания относительного угла ротора генератора для различных случаев.

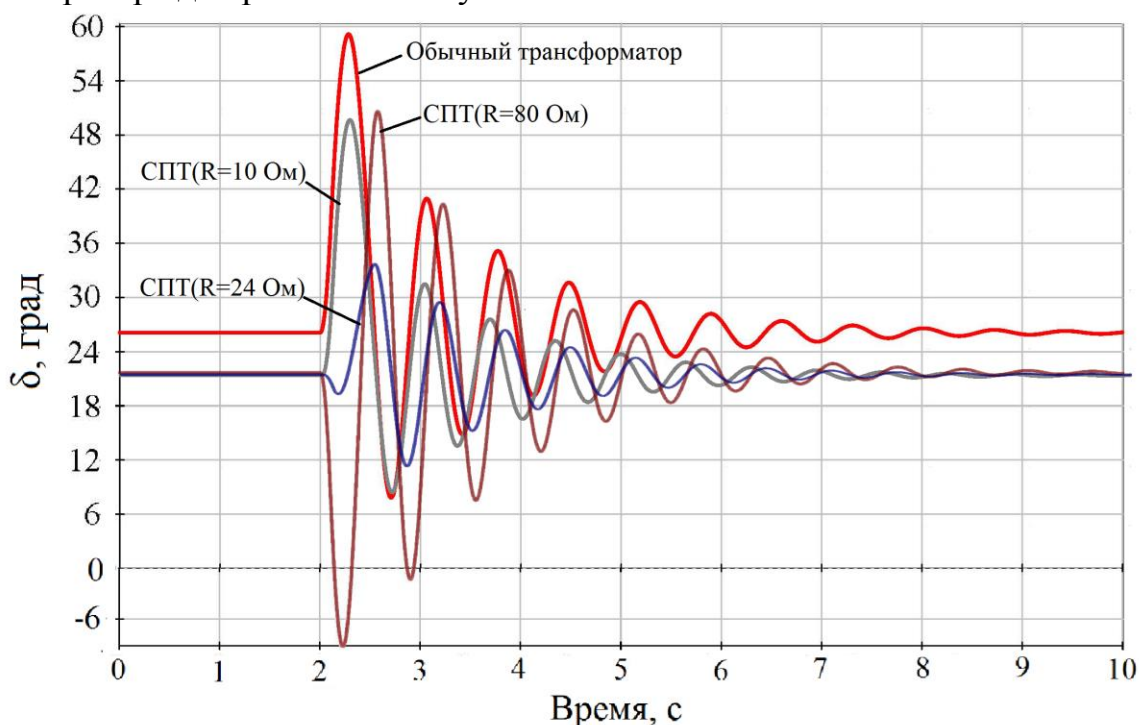


Рисунок 13 – Относительный угол ротора генератора для разных случаев

При использовании СПТ с функцией ограничения токов КЗ динамическая устойчивость улучшается до определённого значения активного сопротивления. С увеличением активного сопротивления размах колебаний увеличивается. Зависимость максимального угла δ от величины активного сопротивления показана на рисунке 14, из которого видно, что минимальные колебания (фактически угол равен доаварийному значению) наблюдаются при значении активного сопротивления около 20 Ом ($\approx 0,1$ о.е.).

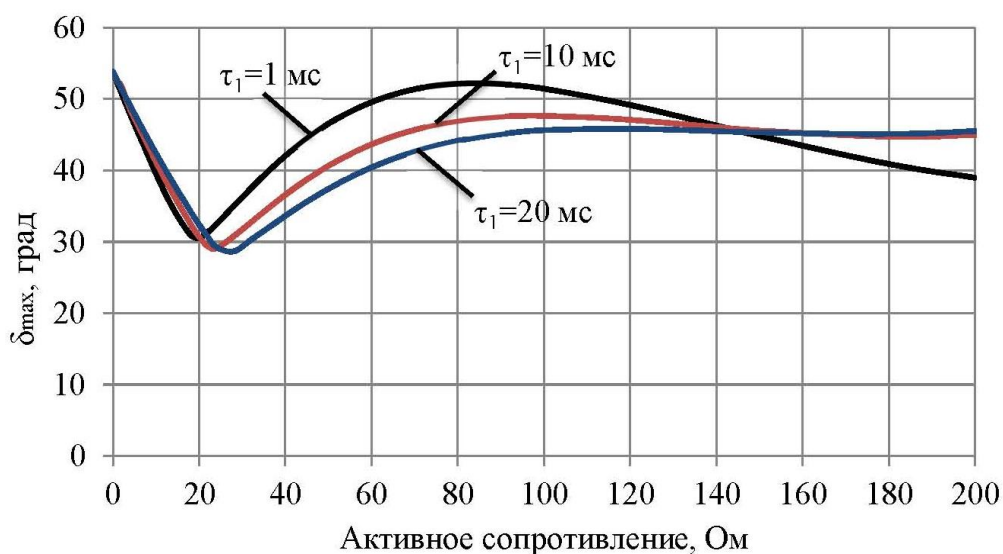


Рисунок 14 – Зависимость амплитуды относительного угла ротора генератора от активного сопротивления трансформатора

Для более наглядного представления влияния СПТ на переходные процессы момент инерции генератора задается большой величиной, в целях исключения качаний ротора генератора. На рисунке 15 приведена кривая тока.

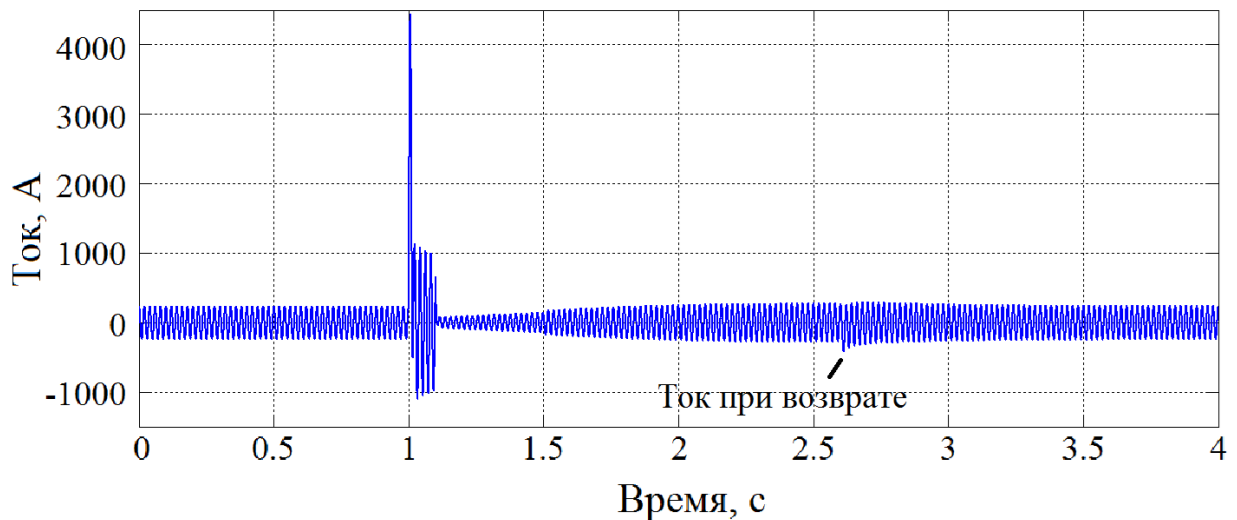


Рисунок 15 – Ток, протекающий через СПТ на стороне ВН при $R_{СПТ}=160 \text{ Ом}$ и $t_{\text{возврата}}=1,5 \text{ с}$

На рисунке 15 видно, что ток КЗ ограничивается активным сопротивлением СПТ, как и ток нагрузки после устранения КЗ. В момент возврата СПТ в сверхпроводящее состояние всплеск тока зависит от величины активного сопротивления при возврате и от времени возврата (рисунок 16).

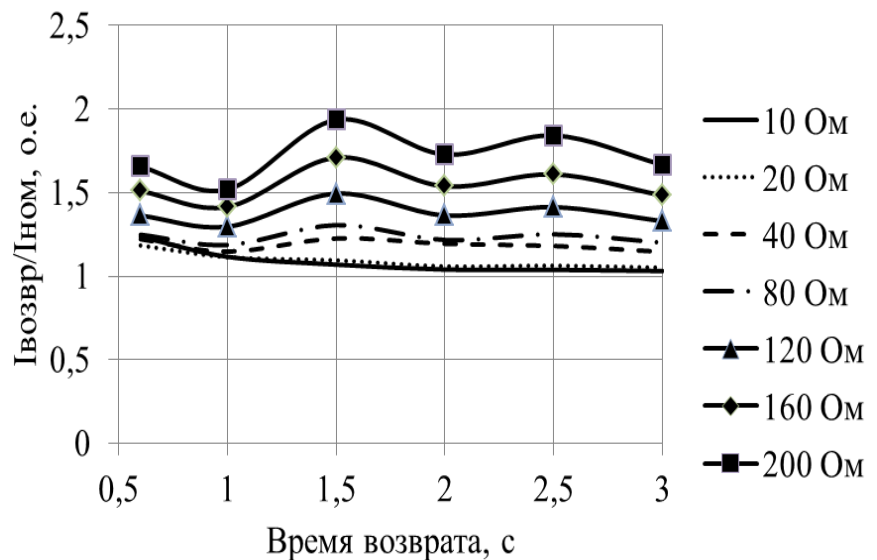


Рисунок 16 – Зависимость тока при возврате от времени возврата при различных значениях активного сопротивления СПТ

Вследствие появления активного сопротивления напряжение на выводах СПТ имеет сниженное значение после устранения КЗ, а в момент возврата наблюдается скачок напряжения, вызванный устранением активного сопротивления, что показано на рисунке 17. На рисунке 18 показана зависимость напряжения при возврате от времени возврата для разных значений активного сопротивления. На рисунке 19 показано падение напряжения на активном сопротивлении СПТ во время КЗ и после его устранения (приведено для фазы).

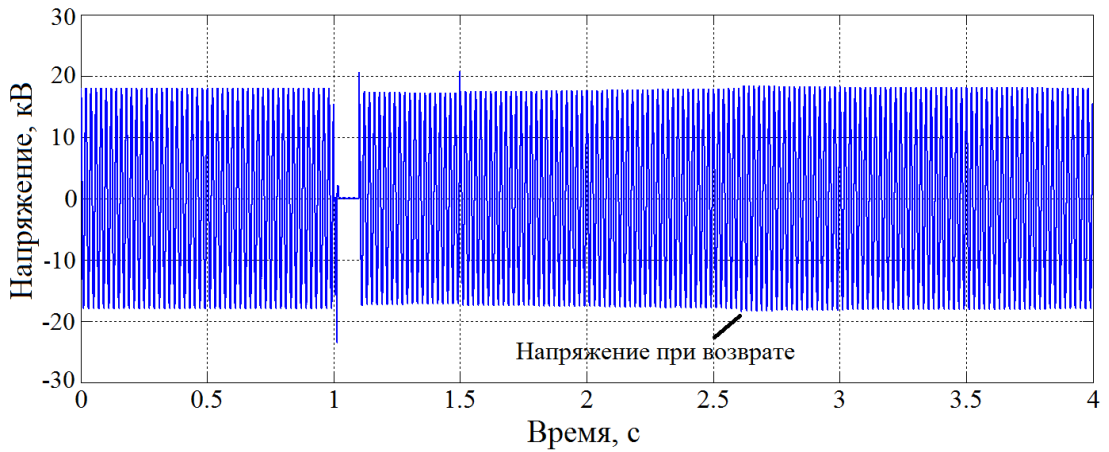


Рисунок 17 – Напряжение на выводах СПТ при $R_{СПТ}=160$ Ом и $t_{возврата}=1,5$ с

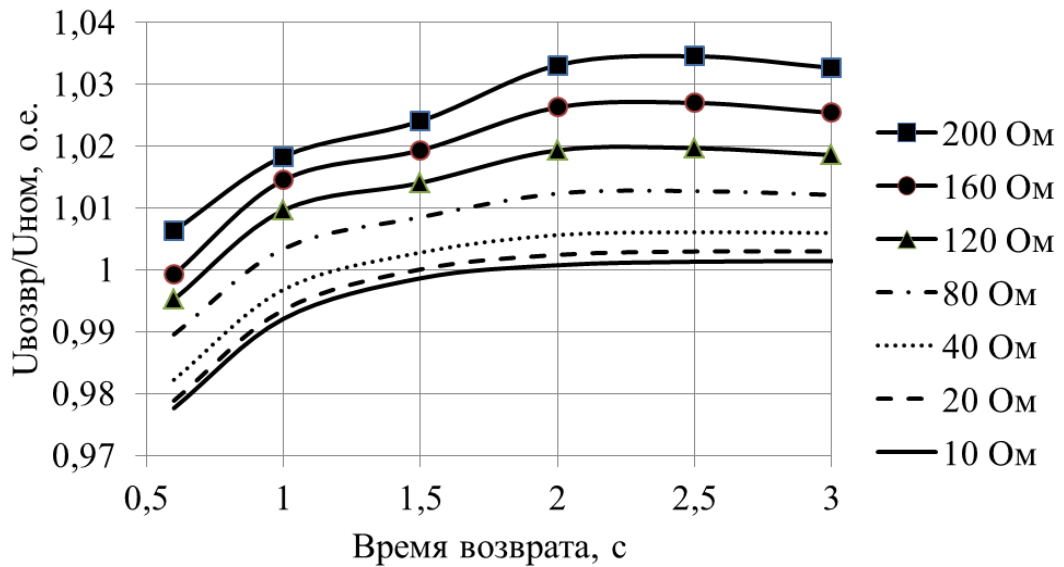


Рисунок 18 – Зависимость напряжения при возврате от времени возврата при различных значениях активного сопротивления СПТ

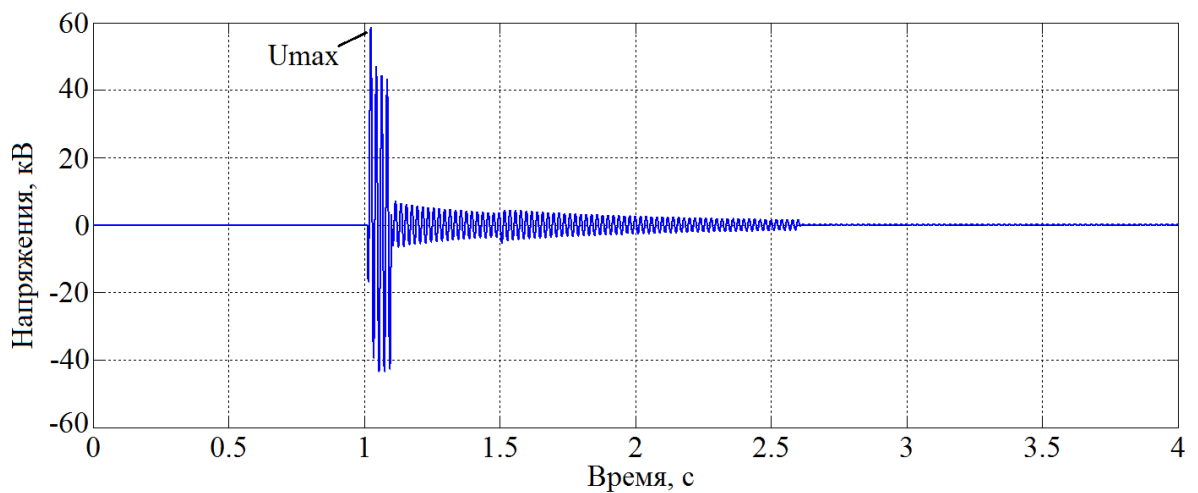
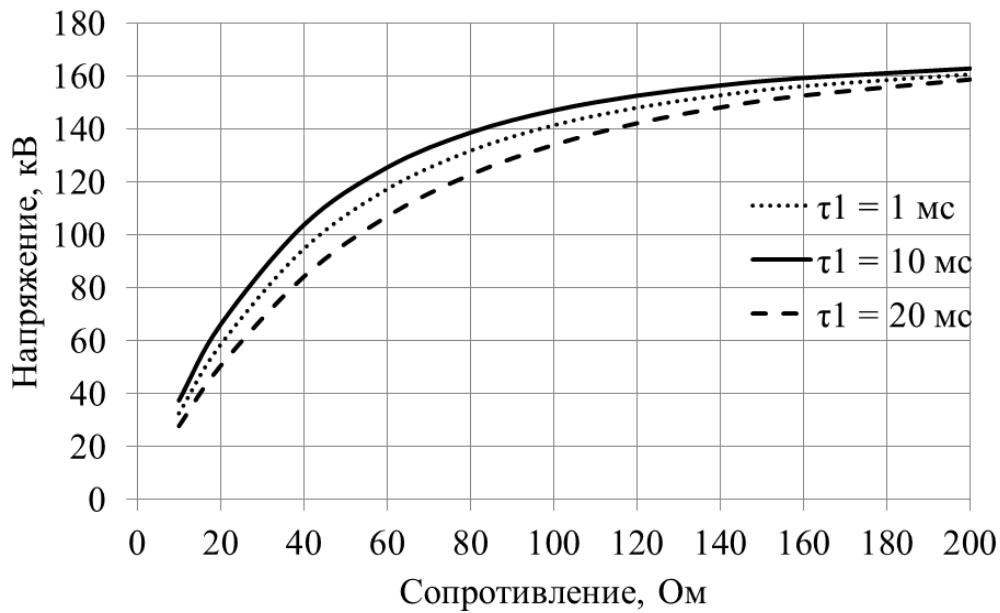


Рисунок 19 – Падение напряжения на активном сопротивлении СПТ при $R_{СПТ}=20$ Ом и $t_{возврата}=1,5$ с

На рисунке 20 проиллюстрирована зависимость падения напряжения от величины активного сопротивления.



Как видно из рисунка 20, для рассматриваемого примера величина этих перенапряжений, как собственно и всплесков тока, не велики при значениях активного сопротивления вблизи $R_{\text{ОПТ}} \approx 20$ Ом.

Рисунок 20 – Зависимость падения напряжения от величины активного сопротивления для разных постоянных времени нарастания активного сопротивления

Мощность, выделяющаяся на активном сопротивлении СПТ, имеет вид, приведенный на рисунке 21.

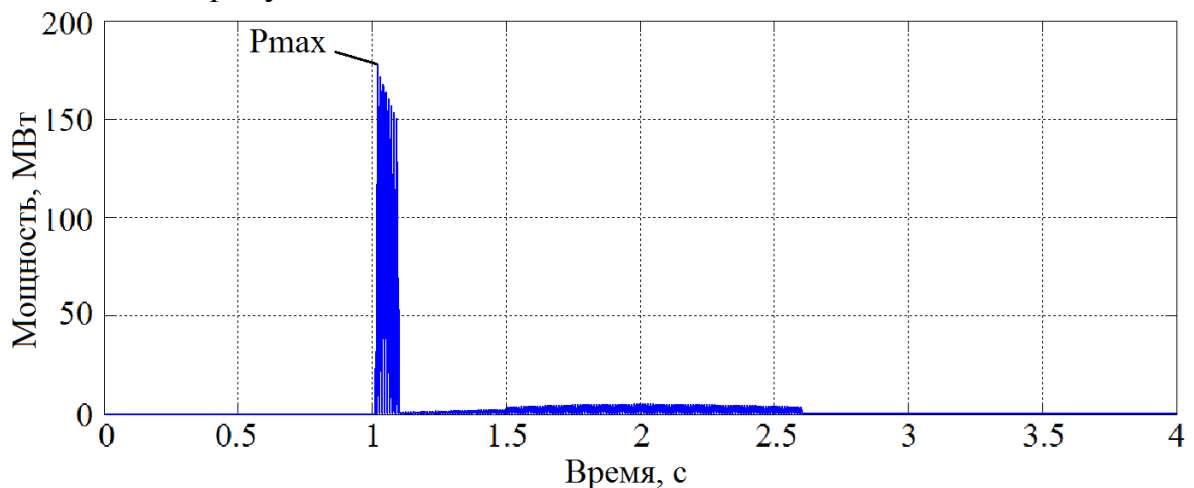


Рисунок 21 – Мощность, выделяющаяся на активном сопротивлении СПТ

Максимум мощности имеет место в начальный момент короткого замыкания (в первом полупериоде) и связан с действием ударного тока КЗ. Зависимость максимальной мощности (мощности в начальный момент КЗ) от величины активного сопротивления и для разных постоянных времени его нарастания приведена на рисунке 22.

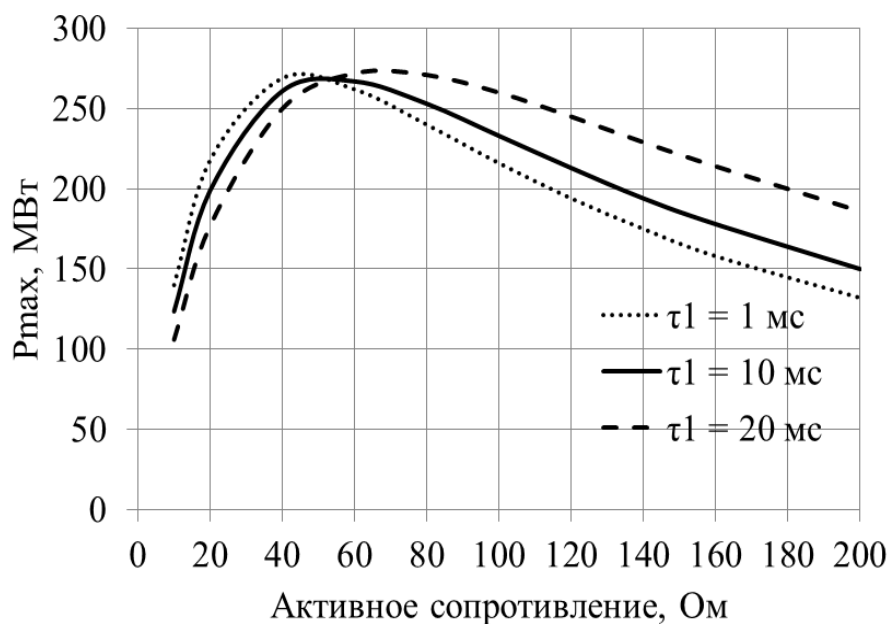


Рисунок 22 – Зависимость максимальной мощности от величины активного сопротивления при разных значениях постоянных времени нарастания активного сопротивления

Из рисунков 21 и 22 видно, что максимальная мощность зависит как от величины активного сопротивления, так и от скорости нарастания этого сопротивления.

Количество теплоты, которое выделяется на активном сопротивлении, играет значительную роль с позиции условий возврата. На рисунке 23 приведено количество теплоты, выделяющееся на активном сопротивлении, за время КЗ и во время возврата СПТ.

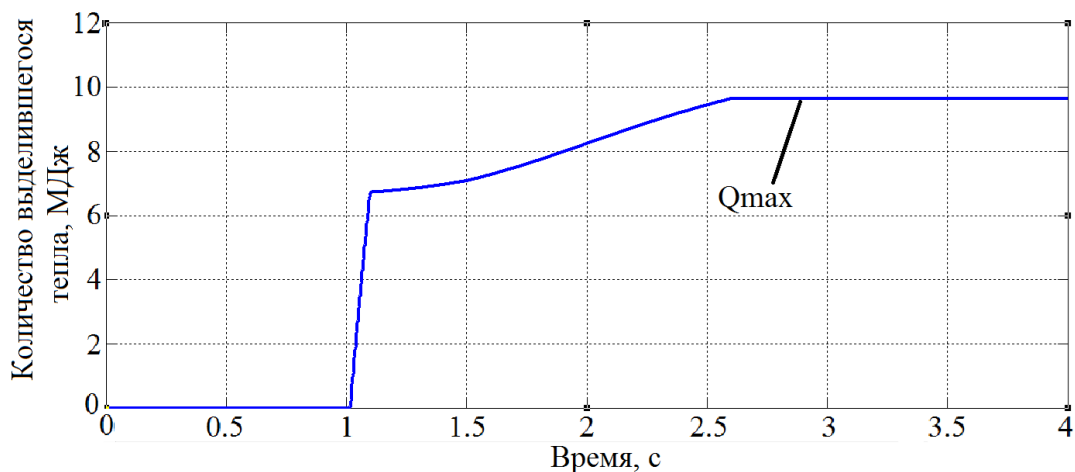


Рисунок 23– Количество выделившегося тепла при $R_{СПТ}=160$ Ом и $t_{возврата}=1,5$ с

Очевидно, что большее количество тепла выделяется во время КЗ. Нужно отметить, что в случае неуспешного возврата в сверхпроводящее состояние СПТ должен отключаться, а система охлаждения, общая теплоемкость обмоток и жидкого азота должны быть рассчитаны для восприятия тепла во время и после устранения КЗ.

На рисунке 24 показано максимальное количество теплоты, выделившееся на момент возврата СПТ в сверхпроводящее состояние.

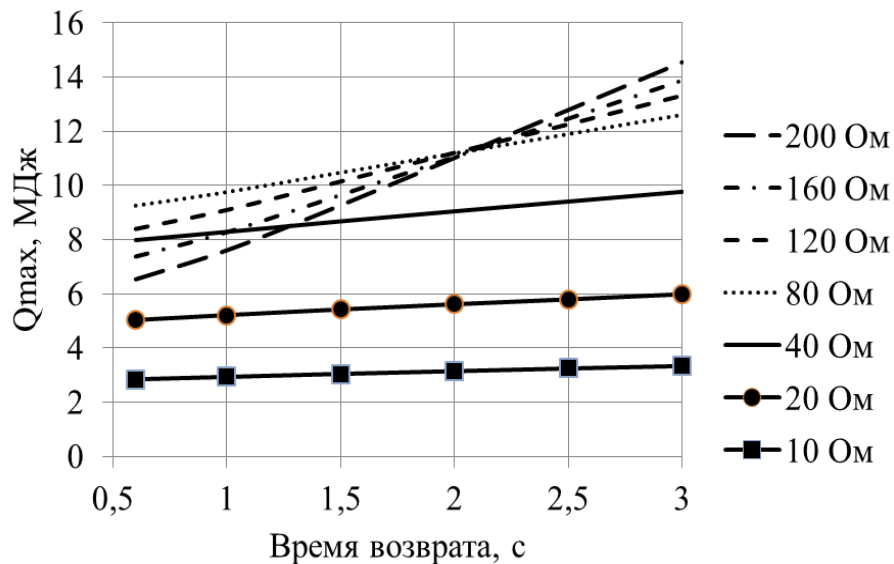


Рисунок 24 – Зависимость выделившегося количества тепла от времени возврата при различных значениях активного сопротивления СПТ

Из построенных зависимостей видно, что момент возврата играет немаловажную роль, и возврат в СП состояние должен происходить в момент времени, не близкий к моменту АПВ линии потому, что устраняющееся скачком активное сопротивление вызывает колебания мощности генератора и угла ротора. Также очевидно, что активные сопротивления большой величины нецелесообразны с точки зрения выделения тепла на активном сопротивлении. Как видно из рисунков, оптимальное значение активного сопротивления для рассмотренного примера составляет около 20 Ом.

В пятом разделе формируются требования к СПТ с позиции ограничения тока КЗ и сохранения устойчивости нагрузки, также рассматриваются технико-экономические аспекты использования СПТ. Производится оценка срока окупаемости СПТ в разных условиях. На рисунке 25 показаны зависимости срока окупаемости от числа часов использования максимальной нагрузки при разных коэффициентах загрузки трансформатора.

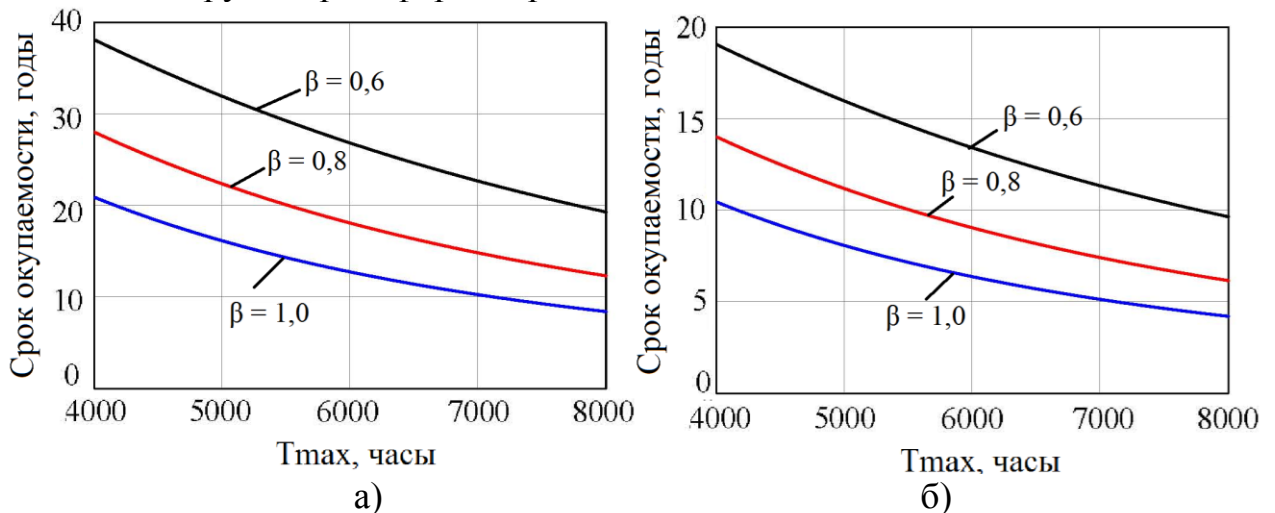


Рисунок 25 – Срок окупаемости при стоимости СПТ в 1,5 раза большей стоимости традиционного трансформатора (а) и при той же стоимости с двойным тарифом на электроэнергию (б)

Проводится оценка эффекта от замены выключателя и кабельной линии. Возможность токоограничения с помощью СПТ позволяет выбрать коммутационные аппараты с меньшей отключающей способностью и кабельные линии с меньшим сечением. Показано, что в распределительных сетях данный эффект не играет существенной роли в общей стоимости оборудования из-за относительной небольшой стоимости выключателя и кабельной линии по сравнению со стоимостью СПТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Показано положительное влияние сверхпроводниковых трансформаторов на рабочие режимы ЭЭС, снижение потерь электроэнергии сопровождается повышением уровня напряжения, а также увеличением предела передаваемой мощности. Продольные и поперечные параметры схемы замещения сверхпроводниковых трансформаторов уменьшаются. Активное сопротивление равно нулю, индуктивное сопротивление снижается пропорционально увеличению плотности тока. Уменьшение параметров поперечной ветви определяется конструктивным исполнением криостата(ов) трансформатора. Массогабаритные показатели сверхпроводниковых трансформаторов снижаются вдвое по сравнению с обычными масляными трансформаторами.

2. Построенная математическая модель сверхпроводниковых трансформаторов позволяет моделировать инерционность изменения их сопротивления, оценить электродинамическое и тепловое воздействия тока КЗ при наличии в электрической сети сверхпроводниковых трансформаторов.

3. Ограничение тока КЗ с помощью сверхпроводниковых трансформаторов и его успешный возврат в СП состояние определяется толщиной стабилизирующего материала. Возврат сверхпроводниковых трансформаторов в СП состояние под нагрузкой зависит от величины тока КЗ и от собственно нагрузочного тока, протекающего после устранения КЗ. Необходимую величину активного сопротивления при КЗ можно подобрать путем частичного задействования витков обмотки в токоограничении, при этом нетокоограничивающая часть обладает незначительным сопротивлением.

4. Разработанный алгоритм и его программная реализация позволяют рассчитывать процессы перехода в нормальное состояние и последующий возврат в сверхпроводящее состояние ВТСП проводов второго поколения.

5. Для статической устойчивости электрических систем установка сверхпроводниковых трансформаторов благоприятна во всех случаях по сравнению с традиционными трансформаторами с точки зрения значений пределов передаваемой мощности, синхронизирующей мощности. В случае установки сверхпроводниковых трансформаторов между двумя электростанциями соизмеримой мощности предел передаваемой мощности увеличивается до 20%.

6. Сверхпроводниковые трансформаторы значительно повышают динамическую устойчивость ЭЭС, если активное сопротивление во время переходного процесса обеспечивает такую характеристику мощности в аварийном режиме, при которой последняя близка к доаварийной. Появление активного сопротивления

большой величины нежелательно как с позиции сохранения устойчивости, так и с позиции успешного возврата сверхпроводникового трансформатора.

7. Использование сверхпроводниковых трансформаторов с токоограничивающей функцией в схемах крупных узловых подстанций электрических сетей и СЭС промышленных предприятий позволяет при координации токов КЗ увеличивать надёжность за счёт возможности совместной работы секций в нормальном режиме работы, обеспечивая качество электрической энергии в соответствии с ГОСТ Р 54149 – 2010.

8. Параллельная работа сверхпроводникового и обычного трансформаторов представляется нецелесообразной по причине неравенства напряжений короткого замыкания. Представляется целесообразным при замене на подстанции одного из двух трансформаторов на СПТ включенным оставлять СПТ, т.к. он обладает большой перегрузочной способностью и меньшими потерями по сравнению даже с двумя параллельно работающими традиционными трансформаторами.

9. Замена выключателей на выключатели с меньшей отключаемой способностью и замена кабелей на кабель с меньшим сечением в распределительных сетях дает незначительный экономический эффект в силу относительно небольшой стоимости последних по сравнению со стоимостью сверхпроводникового трансформатора.

10. В условиях роста цен на электроэнергию, снижения цен на ВТСП провода и установки сверхпроводниковых трансформаторов в местах с большим коэффициентом загрузки (на предприятиях с 2-х, 3-х сменным графиком работы) срок окупаемости сверхпроводниковых трансформаторов составит менее 10 лет.

Список основных опубликованных работ по теме диссертации:

Статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК:

1. Александров Н.В. Эффективность применения высокотемпературных сверхпроводящих трансформаторов в электроэнергетических системах / В.З. Манусов, Н.В. Александров // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – №1. – с. 358-361.

2. Александров Н.В. Влияние сверхпроводящих трансформаторов на устойчивость электроэнергетической системы / В.З. Манусов, Н.В. Александров // Научный вестник НГТУ. – 2013. – №3(52). – с. 160-165.

3. Александров Н.В. Ограничение токов короткого замыкания с помощью трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками / В.З. Манусов, Н.В. Александров // Известия ТПУ. – 2013. – №4. – с. 100-105.

Патенты

4. Патент РФ на полезную модель 132250, МПК H01F 6/06, H01F 36/00. Сверхпроводящая обмотка трансформатора / В.З. Манусов, Н.В. Александров – № 2013110092/07; заявл 06.03. 2013; опубл. 10.09.2013. Бюл. № 26. – 1 с.

Материалы международных и всероссийских конференций:

5. Aleksandrov N.V. Impact of superconducting transformers on electric power system stability / V.Z. Manusov, N.V. Aleksandrov, B.V. Lukutin // 13th 2013 Interna-

tional Conference on Environment and Electrical Engineering, November 1-3, 2013, Wroclaw, Poland.

6. Александров Н.В. Трансформаторы с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками/ В.З. Манусов, Н.В. Александров // XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»: Тез. докл. междунар. науч. конф. 18-22 апреля 2011 г. –Томск, 2011. – т.1. – с. 9-10.

7. Александров Н.В. Перспективы применения высокотемпературных сверхпроводящих трансформаторов в системах электроснабжения / В.З. Манусов, Н.В. Александров // XVIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» : Тез. докл. междунар. науч. конф. 9-13 апреля 2012 г. –Томск, 2012. – т.1. – с. 9-10.

8. Александров Н.В. Оценка влияния высокотемпературного сверхпроводящего трансформатора на статическую устойчивость электроэнергетической системы / В.З. Манусов, Н.В. Александров // V Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования» 17-18 мая 2012 г: Тез. докл. всеросс. науч. конф. – Томск, 2012. – с. 4-6.

9. Александров Н.В. Моделирование высокотемпературных сверхпроводящих трансформаторов в системах электроснабжения / В.З. Манусов, Н.В. Александров // Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» 29 ноября- 2 декабря 2012 г: Тез. докл. всеросс. науч. конф. – Новосибирск, 2012. – с. 67-71.

10. Александров Н.В. Уменьшение ударного тока короткого замыкания с помощью трансформатора с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками / В.З. Манусов, Н.В. Александров // II Всероссийская научно-техническая конференция «Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы» 23 – 24 ноября 2012 г: Тез. докл. всеросс. науч. конф. – Рубцовск, 2012. – с. 225-228.

11. Александров Н.В. Ограничение токов короткого замыкания сверхпроводящими трансформаторами / В.З. Манусов, Н.В. Александров // XIX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» 15-19 апреля 2013 г: Тез. докл. междунар. науч. конф. – Томск, 2013. – т.1.– с. 5-6.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
тел./факс. (383) 346-08-57
формат 60 X 84/16, объём 1.5 п.л., тираж 100 экз.
заказ № подписано в печать 21.02.2014 г.