

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Новосибирский государственный
технический университет»

На правах рукописи

АЛЕКСАНДРОВ НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

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

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель -
доктор технических наук,
профессор В.З. Манусов

Новосибирск – 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ.....	10
1.1. Явление сверхпроводимости	10
1.2. Современные токонесущие элементы на основе высокотемпературных сверхпроводников	14
1.3. Применение высокотемпературных сверхпроводников в электроэнергетике	18
1.4. Криогенная техника для охлаждения сверхпроводниковых устройств	35
1.5. Выводы	38
2. НАГРУЗОЧНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ	40
2.1. Постановка задачи.....	40
2.2. Параметры схемы замещения сверхпроводникового трансформатора.....	40
2.3. Векторная диаграмма сверхпроводникового трансформатора и влияние на уровень напряжения.....	44
2.4. Потери в сверхпроводниковом трансформаторе	48
2.5. Параллельная работа с обычным трансформатором.....	53
2.6. Сравнительный анализ габаритных показателей.....	55
2.7. Расчет нагрузочного режима	58
2.8. Выводы	61
3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СЕТЯХ, СОДЕРЖАЩИХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ	62
3.1. Постановка задачи.....	62
3.2. Переход в нормальное состояние и возврат в сверхпроводящее состояние ВТСП проводов второго поколения.....	62

3.3. Математическая модель электромагнитных переходных процессов в цепях содержащих сверхпроводниковые трансформаторы	72
3.4. Определение возможности ограничения токов короткого замыкания	76
3.5. Сравнительный анализ случаев использования СПТ и обычного трансформатора с расщепленной обмоткой.....	83
3.6. Бросок тока намагничивания в сверхпроводниковом трансформаторе.....	85
3.7. Выводы.....	89
4. ВЛИЯНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ.....	90
4.1. Постановка задачи.....	90
4.2. Влияние сверхпроводниковых трансформаторов на статическую устойчивость.....	90
4.3. Влияние сверхпроводниковых трансформаторов на динамическую устойчивость.....	94
4.4. Численный расчет параметров электромеханических переходных процессов при наличии в сети сверхпроводникового трансформатора.....	99
4.5. Выводы.....	109
5. ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К СВЕРХПРОВОДНИКОВЫМ ТРАНСФОРМАТОРАМ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ.....	110
5.1. Постановка задачи.....	110
5.2. Формирование требований	111
5.2.1. Требование с точки зрения устойчивости нагрузки.....	111
5.2.2. Требование с точки зрения критического тока.....	113
5.2.3. Требования с точки зрения ограничения тока КЗ	114
5.3. Оценка коммерческой эффективности применения сверхпроводниковых трансформаторов.....	116
5.4. Сравнительный анализ сопоставляемых вариантов и обоснование целесообразности применения сверхпроводниковых трансформаторов.....	126

5.5. Эффекты от замены выключателя и кабельной линии	129
5.6. Выводы.....	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	134
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	136
ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ.....	145
Приложение А	146
Приложение Б	153

ВВЕДЕНИЕ

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 электрической энергии, 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 [1]. 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 [2].

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, воз-

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 электрооборудования 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.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

1.1. Явление сверхпроводимости

Сверхпроводимость – явления отсутствия сопротивления электрическому току. Открытие явления сверхпроводимости связано с исследованием электрического сопротивления металлов при низких температурах - вблизи абсолютного нуля (1...10 К). Получение таких низких температур стало возможно после ожижения инертного газа гелия. В 1908 г. в криогенной лаборатории Лейденского университета (Нидерланды) Хейке Камерлинг - Оннесу удалось получить жидкий гелий, а через три года он уже открыл явление сверхпроводимости. Вначале была получена сверхпроводимость ртути, сопротивление которой при температуре 4,2 К резко уменьшалось до столь малой величины, что ее не удавалось обнаружить никаким способом. Температура при которой возникает сверхпроводимость была названа критической - T_K . По оценке Оннеса, сопротивление ртути в точке перехода в сверхпроводящее состояние становилось меньше одной миллионной от своего первоначального значения. После этого Оннес показал, что в сверхпроводящее (СП) состояние переходят и другие материалы (металлы) [2].

Сверхпроводящее состояние металлических веществ имело место в ограниченном диапазоне изменения температуры и индукции магнитного поля. Ниже критической температуры нарушение сверхпроводимости могло быть достигнуто помещением сверхпроводника во внешнее магнитное поле. Минимальное значение индукции магнитного поля, при котором разрушается сверхпроводимость, назвали критической индукцией магнитного поля - B_K . Ученые также обнаружили, что для поддержания сверхпроводимости необходимо, чтобы ток, протекающий по сверхпроводнику, не превышал некоторого критического значения. На рисунке 1.1 показана область сверхпроводимости, ограниченная тремя критическими параметрами.

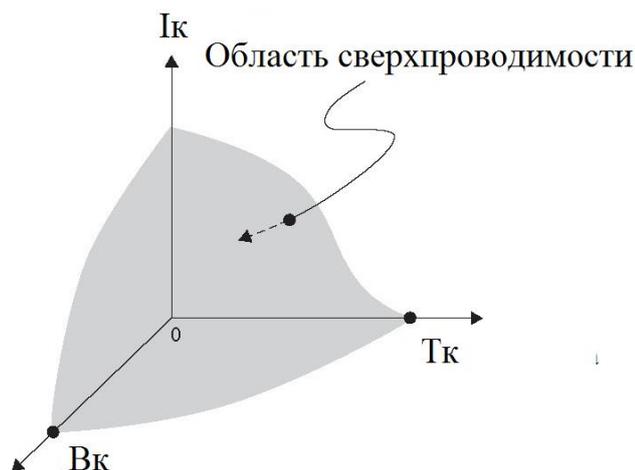


Рисунок 1.1 – Область сверхпроводимости

В 1933 г. в результате экспериментальных исследований В. Мейснер и Р. Оксенфельд обнаружили свойство диамагнетизма сверхпроводников, что для выяснения природы сверхпроводимости имело такое же значение, как само открытие Оннеса. Однако в связи с низкими значениями параметров T_K и V_K этот период характеризовался отсутствием практического применения сверхпроводимости на основе сверхпроводников из чистых металлов, которые впоследствии образовали сверхпроводники первого рода (кроме ниобия, ванадия и технеция). Такая картина наблюдалась до 1957 г., пока не были открыты сверхпроводники второго рода - на базе сверхпроводящих сплавов и интерметаллических соединений с высокими критическими параметрами [2].

В 1986 году были открыты высокотемпературные сверхпроводники, представляющие собой соединения на основе лантана, висмута и таллия, содержащие атомы меди и кислорода. Эти соединения характеризуются высоким значением T_K , что обеспечило многочисленные применения сверхпроводимости, которые ранее не могли быть реализованы по экономическим причинам.

На рисунке 1.2 приведена хронология роста критической температуры сверхпроводников.

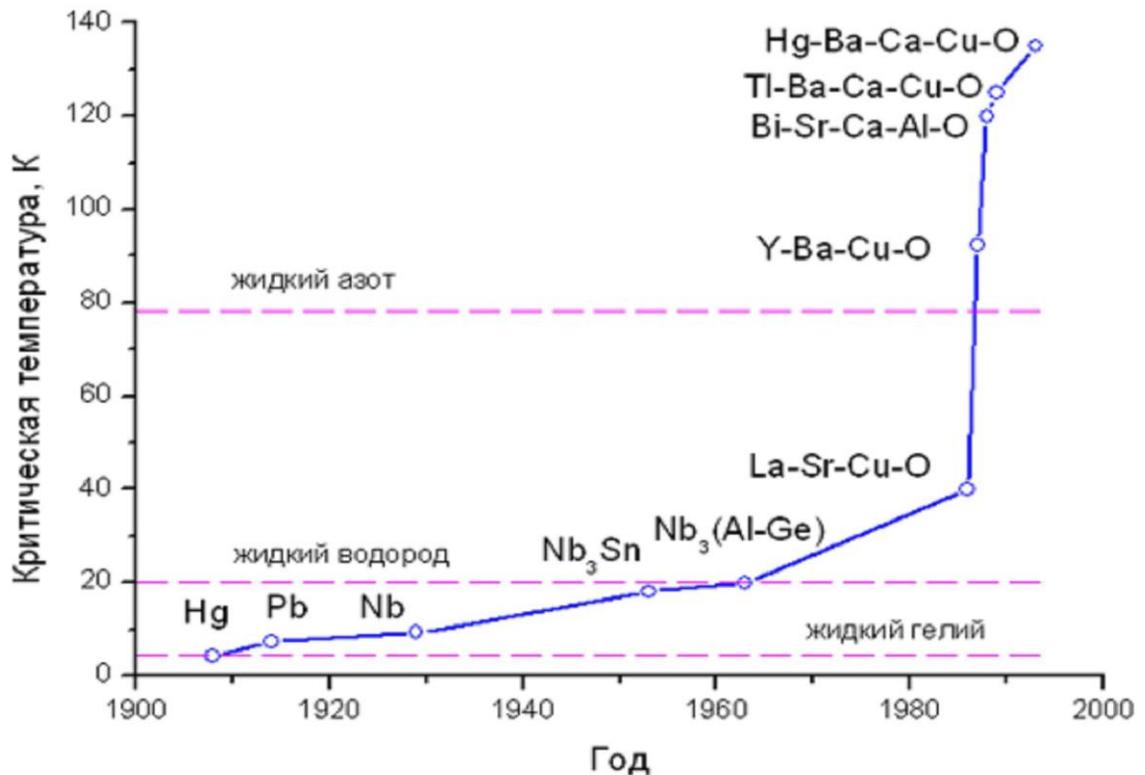


Рисунок 1.2 – Хронология роста критической температуры сверхпроводников

Решающее значение для исследования и разработки сверхпроводимости и на их основе разных СП устройств имело создание последовательной теории сверхпроводимости. Первые попытки создания феноменологической теории сверхпроводимости были предприняты в середине 30-х годов немецкими физиками братьями Лондонами. Предложенные ими уравнения сверхпроводника позволили описать поведение сверхпроводника с током в магнитном поле. Ими было введено одно из фундаментальных понятий о глубине проникновения магнитного поля в сверхпроводник, имеющей очень важное значение для характеристики свойств сверхпроводника. Однако в этой теории отсутствовал ответ на главный вопрос – о причинах возникновения сверхпроводимости.

Значительный шаг в понимании природы сверхпроводимости сделал А. Пиппард, который ввел в 1950 году понятие о характерном расстоянии, на котором могут происходить существенные изменения в характеристиках сверхпроводящего состояния.

Существенный вклад в развитие теории внесли В.Л. Гинзбург и Л.Д. Ландау, применившие для описания состояния сверхпроводимости методы квантовой механики. В 1957 году на основе этой теории А.А. Абрикосов создал тео-

рию сверхпроводников второго рода. До сих пор эта теория служит основным инструментом для расчета эксплуатационных характеристик реальных сверхпроводящих проводов и устройств. Однако и эти теории оставались феноменологическими.

Ландау в своих работах описал свойства близкого по многим проявлениям физического эффекта – сверхтекучести жидкого гелия. Эта теория была построена в 30-х годах прошлого столетия и на первый взгляд могла быть автоматически использована для объяснения сверхпроводимости. Но сумели это сделать лишь в конце 50-х годов американские теоретики Дж. Бардин, Л. Купер и Дж. Шриффер. Только после появления их работ стал понятен механизм сверхпроводимости. В них впервые было показано, что сверхпроводящий ток переносится электронными парами, которые образуют связанные квазичастицы внутри сверхпроводника за счет обмена фононами [2].

После открытия высокотемпературной сверхпроводимости ведущие физики-теоретики прикладывают огромные усилия для создания теории, способной объяснить это явление. Все эти модели предполагают, что, как и в классических сверхпроводниках, в высокотемпературных сверхпроводниках электроны объединяются в пары. Однако до сих пор так и не предложен механизм, который смог бы убедительно объяснить причины возникновения сил притяжения между электронами при столь высоких температурах.

В последние годы ведутся разработки оборудования с использованием явления сверхпроводимости, и близко время, когда эти устройства найдут широкое применение. В России разработка и серийное применение СПТ было включено в п.9.2. концепции технической политики в электроэнергетике России до 2030 года. На сегодняшний день использование СПТ включено в программу ФСК ЕЭС по использованию сверхпроводниковых технологий [4]. Согласно п.7 (инновационной и научно-технической политике в энергетике) энергетической стратегии России на период до 2030 года, утвержденной распоряжением правительства РФ от 13 ноября 2009 года N 1715-р ставится задача организации производства ВТСП и создания устройств на их основе [5].

В 2007 г. по инициативе РАО «ЕЭС России» на основе предложений ОАО «НТЦ электроэнергетики» и РНЦ «Курчатовский институт» была разработана и утверждена комплексная программа по созданию ВТСП оборудования и технологий его применения в электроэнергетике со сроком ее исполнения до 2015 г. Цель программы – реализовать на базе ВТСП принципиально новую технологическую основу для российской электроэнергетики, существенно повышающую надежность и экономичность ее функционирования. В рамках проекта «Инновационная энергетика» по приоритетному направлению «Энергоэффективность» к декабрю 2013 г. на базе организаций атомной отрасли будет сформирована инфраструктура для коммерциализации СП-технологий. Будут созданы опытные и макетные производства материалов ленточных ВТСП второго поколения и объемных керамик для производства ВТСП, сверхпроводниковых ограничителей токов короткого замыкания для сетей, а также кинетического накопителя энергии со сверхпроводниковым магнитным подвесом. К декабрю 2015 г. запланированы запуск опытного производства длинномерных (до 1000 м) ленточных ВТСП второго поколения, создание опытных образцов сверхпроводниковых электродвигателей большой мощности, индуктивных накопителей энергии, токовводов, трансформаторов и синхронных генераторов большой мощности, а также комплекс испытаний и исследований сверхпроводникового оборудования [6].

1.2. Современные токонесущие элементы на основе высокотемпературных сверхпроводников

Открытие явления высокотемпературной сверхпроводимости и достигнутое повышение их критической температуры до ~ 100 К создало принципиально новые возможности для практических применений сверхпроводимости. Главная из них состоит в повышении рабочих температур сверхпроводниковых устройств от единиц градусов Кельвин до температур 30–100 К. Существующие на сегодняшний день технологии позволяют получать токонесущие ВТСП элементы в виде композитных ВТСП проводов, объемных элементов с монокристаллической структурой, а также в виде листовых композитов. В последние годы

в США была разработана технология, позволяющая получать пленочные ВТСП материалы методом напыления. Общая классификация СП материалов приведена на рисунке 1.3 [7].

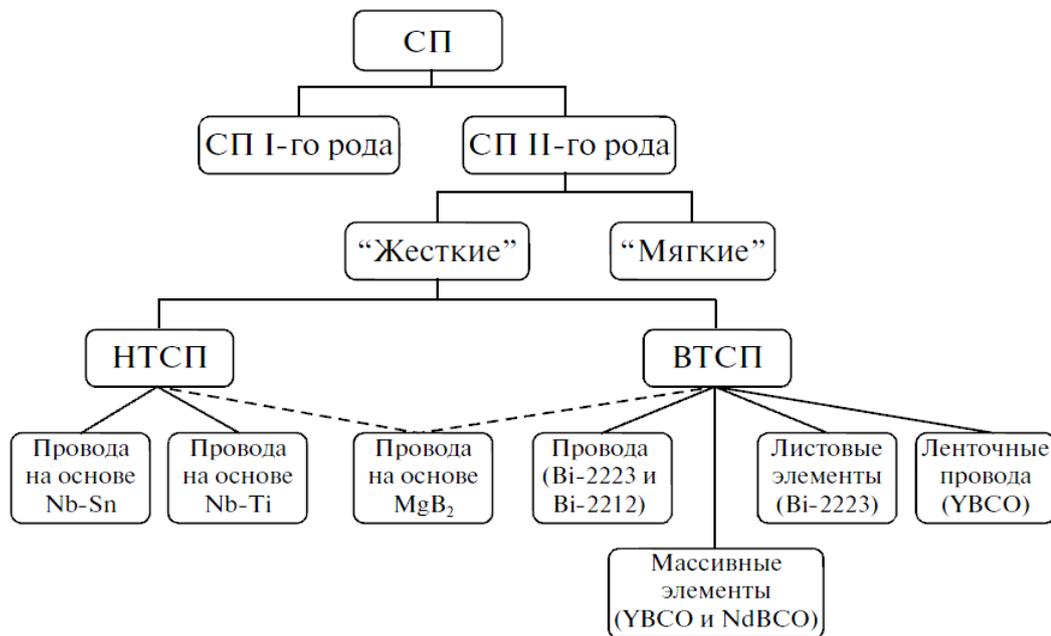


Рисунок 1.3 – Классификация СП материалов [7]

Высокотемпературные сверхпроводники относятся к сверхпроводникам 2 рода, в которых фазовый переход из нормального состояния в сверхпроводящее (или обратно) происходит не сразу, а имеется промежуточное смешанное состояние, ограниченное первым и вторым критическим полями B_{K1} и B_{K2} соответственно.

Среди ВТСП проводов выделяют провода двух поколений. Провода 1-го поколения (1G) – это провода на основе серебряной матрицы с микроканалами, в которых находится сверхпроводящая керамика Bi-Sr-Ca-Cu-O (BSCCO), как правило, $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$ (Bi-2212) с критической температурой 80 К или $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ (Bi-2223) с критической температурой 110 К.

Первые длинномерные провода 1G были созданы в середине 90-х. Сегодня технология их производства («порошок в трубе») достаточно хорошо развита, в мире выпускаются сотни километров провода, которые идут на создание прототипов сверхпроводникового электротехнического оборудования. Особенных успехов в этой технологии достигла японская фирма Sumitomo. Однако провода

1G более чем на 2/3 состоят из чистого серебра, что исключает значительное снижение их стоимости в будущем.

Есть ещё один недостаток: сверхпроводимость в BSCCO быстро разрушается во внешнем магнитном поле. Это ограничивает спектр применения сверхпроводников первого поколения устройствами с относительно слабыми рабочими магнитными полями и делает бесперспективным изготовление на их основе таких изделий как генераторы, моторы, накопители энергии и т.д.

Эти обстоятельства привели к разработке сверхпроводников второго поколения (2G) на основе иттриевой керамики Y-Ba-Cu-O (YBCO) с критической температурой 92 К. Эти сверхпроводники, часто именуемые «лентами с покрытием» (англ. coated conductors), являются на сегодняшний день самым перспективным направлением развития технической сверхпроводимости. Основное фундаментальное преимущество 2G заключается в том, что они обладают максимальной плотностью критического тока. На рисунке 1.4 нетрудно заметить, что сверхпроводник составляет лишь малую часть от общего поперечного сечения провода: в лентах 1-го поколения эта величина обычно не превышает 40%, а в лентах 2-го поколения и того меньше – 5% [8].

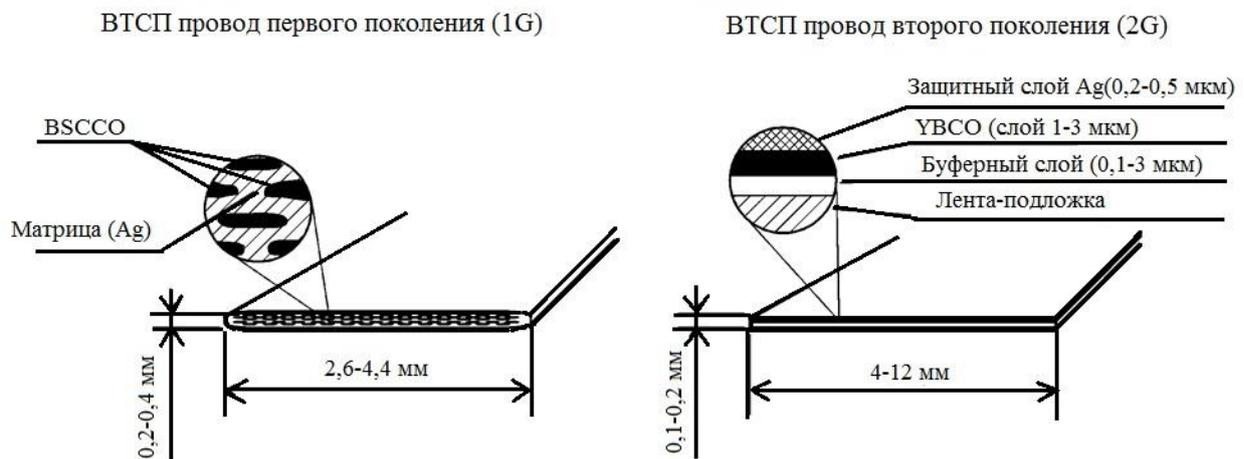


Рисунок 1.4 – Сечение ВТСП лент на основе BSCCO и YBCO

На рисунке 1.5 приведена структура ВТСП провода второго поколения производящей фирмой SuperPower.

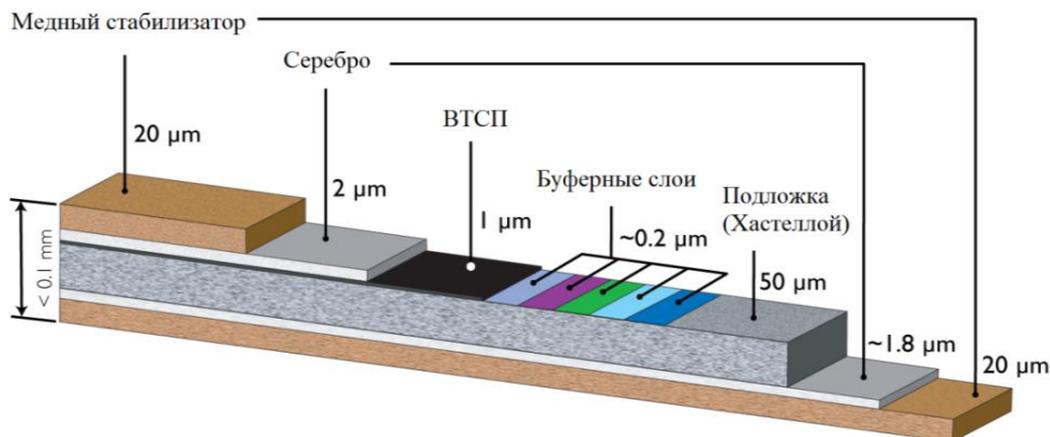


Рисунок 1.5 – Структура ВТСП провода второго поколения производства фирмы SuperPower

Для создания лент 2-го поколения обычно применяют ленты-подложки (как правило, из сплавов на основе никеля), а ВТСП жила одна и представляет собой тонкое покрытие на поверхности ленты. Для предотвращения химического взаимодействия ВТСП и ленты используют так называемый «буферный слой» – ключевое звено в технологии изготовления. Металлический защитный слой (как правило, из серебра) предохраняет ВТСП от взаимодействия с парами воды и CO_2 воздуха, служит защитой от механических повреждений и от прямого контакта ВТСП со стабилизатором – слоем СП провода, функциональное назначение которого заключается в шунтировании СП слоя при потере им СП состояния (упрочненная медь, нержавеющая сталь). Плотность тока в самом ВТСП материале (YBCO) на постоянном токе и при 77 К может составлять до 10^6 А/см^2 . С учетом того, что критический ток сверхпроводника при использовании его на переменном токе снижается примерно наполовину и с учетом того, что ВТСП слой занимает лишь 1-5% от общего поперечного сечения ВТСП провода, рабочая плотность тока в СПТ составляет примерно 50–150 А/мм².

ВТСП провода первого и второго поколений отличаются не только технологией изготовления, но химическим составом, механическими и электрофизическими параметрами. В электроэнергетических ВТСП устройствах провода охлаждаются жидким азотом при 77 К. Различие критических температур проводов первого и второго поколений приводит к тому, что относительно небольшой (на

10-15К) разогрев проводов выше температуры жидкого азота по-разному влияет на их сверхпроводящее состояние. Для проводов первого поколения разогрев приводит к некоторому снижению критического тока без потери сверхпроводимости, провода второго поколения практически теряют способность пропускать сколько-нибудь значительный сверхпроводящий ток (при $T \approx 92 \text{ K}$) или полностью переходят в нормальное состояние (при $T > 92 \text{ K}$). Из этого следует, что тепловые процессы должны играть существенную роль в работе электротехнических устройств с использованием ВТСП проводов второго поколения [9].

1.3. Применение высокотемпературных сверхпроводников в электроэнергетике

Сверхпроводниковые кабели.

Сверхпроводниковые кабели по сравнению с обычными обладают уменьшенными потерями, большей пропускной способностью даже при снижении класса напряжения, пожаробезопасны и экологичны, что также играет немаловажную роль. При одинаковой мощности по сравнению с обычным кабелем ВТСП кабель имеет меньший вес и более компактен, это облегчает монтаж и транспортировку, для него требуется меньшее количество муфт, следовательно, уменьшается площадь прокладки. Особенность охлаждения ВТСП кабелей позволяет избежать нежелательного перегрева электрической изоляции. В связи с тем, что потери электроэнергии на переменном токе имеют место в СП проводах, для ВТСП кабелей более экономично передавать электроэнергию на постоянном токе [10].

Наиболее крупными разработчиками ВТСП кабелей являются Southwire (США), Sumitomo Electric (Япония), Pirelli (Италия), Condumex Cable (Мексика), NKT Cables (Дания), CAS, IEE, TIPC (Китай) и другие. В таблице 1.1 приведены наиболее крупные существующие и проектируемые кабели с использованием ВТСП проводников [10].

Таблица 1.1 – Существующие и проектируемые ВТСП кабели [13]

Страна/ место/ проект	Напряжение, кВ/ток, кА	Длина, м	Тип кабеля	Провод- ник	Дата
USA/ Carrollton, GA	12.5/1,25	30	3 фазы в отдельных криостатах	Bi	2000-
USA/ Detroit	24/2,4	120	3 фазы в отдельных криостатах	Bi	2001
Japan/ Yokosuka	66/1	100	3 фазы в общем криостате	Bi	2001- 2002
Denmark/ Copenhagen	36/2	30	3 фазы в отдельных криостатах	Bi	2001- 2003
China/ Yunnan	35/2	33.5	3 фазы в отдельных криостатах	Bi	2003- 2005
China/ Lanzhou	10,5/1,5	75	3 фазы в отдельных криостатах	Bi	2003- 2005
Japan/ Yokosuka/ Super Ace	77/1	500	однофазный	Bi	2004- 2005
USA/ Albany	34,5/0,8	350	3 фазы в общем криостате	Bi, Bi/Y	2006- 2008
USA/ Columbus, OH	13,2/3	200	трехфазный, коаксиальный	Bi	2006-
Korea/ Gochang	22,9/1,26	100	3 фазы в общем криостате	Bi	2006-
Japan/ Kyoto	66/1	20	3 фазы в общем криостате	Y	2006-2007
Japan/ Yokohama	66/3	~250	3 фазы в общем криостате	Bi	2007-2012
USA/Long Island/ LIPA	138/2.4	600	3 фазы в отдельных криостатах	Bi	2008-
USA/ New York/ HYDRA	13,8/4	300	трехфазный, коаксиальный	Y	2008-2010
Korea/ Seoul/ GENI	22,9/1,26	500	3 фазы в отдельных криостатах	Y	2008-2010
Japan/ Kumatori/ M- PACC	66/5	15	3 фазы в общем криостате	Y	2008-2012
Japan/ Ichihara/ M-PACC	275/3	30	однофазный	Y	2008-2012
EU/ Spain/ Super-3C	10/1	30	однофазный	Y	2009
Russia/ Moscow	20/1,5	200	3 фазы в отдельных криостатах	Bi	2009-2010
Japan/ Kasugai/ CASER-2	DC±10/2	200	одножильный, биполярный	Bi	2010-
Korea/ Gochang/ DAPAS	154/3,75	100	3 фазы в отдельных криостатах	Y	2010
SA/ Long Island/ LIPA-2	138/2,4	<600	3 фазы в отдельных криостатах	Y	2011-

Продолжение таблицы 1.1

Страна/ место/ проект	Напряжение, кВ/ток, кА	Длина, м	Тип кабеля	Проводник	Дата
China/ Baiyin	10,5/1,5	75	трехфазный	Y	2011-
China/ Beijing	110/3	1000	не решено	Y	2012-
Netherlands/ Amsterdam/ Alliander	50/3	6000	трехфазный, коаксиальный	Y	Планируется (2012?)

Сверхпроводниковые двигатели и генераторы.

ВТСП технологии активно используются в электрических машинах. Экспериментально и теоретически показано, что использование ВТСП элементов в роторах электрических машин позволяет существенно снизить металлоёмкость единичного устройства (в 2 – 4 раза), увеличить (в 1,5 – 2 раза) выходную мощность и, соответственно, уменьшить затраты, связанные с эксплуатацией и производством новых типов электрических машин.

Работы в области ВТСП машиностроения разделили спектр применяемых устройств на две группы: 1) Электрические машины с ВТСП массивами; 2) Электрические машины с обмотками из ленточных проводов.

В первом случае массив захватывает магнитный поток, в нем наводятся токи и по принципу работы электрическая машина с ВТСП массивами отдаленно напоминает машину с постоянными магнитами: она бесконтактная и не требует подведения тока к индуктору. Во втором случае обмотки работают по обычным для электрических машин принципам [20].

В таблицах 1.2 и 1.3 приведены наиболее крупные проекты ВТСП двигателей и ВТСП генераторов соответственно.

Таблица 1.2 – Существующие в мире проекты ВТСП электродвигателей [13]

Организация	Страна	Год	Тип	S, МВА	n, об/мин	m, т	ВТСП
AMSC	США	2001	Электродвигатель	3,8	1800	6,8	BSCCO
Oswald	Германия	2002	Электродвигатель с высоким моментом	0,2			ВТСП массив
AMSC	США	2003	Судовой электродвигатель	5	230		BSCCO

Продолжение таблицы 1.2

Организация	Страна	Год	Тип	S, МВА	n, об/мин	m, т	ВТСП
KERI/ Doosan	Корея	2007	Электродвигатель	0,08			BSCCO
Sumitomo Electric Industries	Япония	2007	Судовой электродвигатель	0,365	250	4,4	BSCCO
AMSC	США	2007	Судовой электродвигатель	36,5	120	< 75	BSCCO
Siemens	Германия	2008	Судовой электродвигатель	4	120		BSCCO
KERI/ Doosan	Корея	2011	Электродвигатель	5			BSCCO

Таблица 1.3 – Существующие в мире проекты ВТСП генераторов [13]

Организация	Страна	Год	Тип	Мощность, МВА	Число оборотов в минуту	Масса, т	КПД, %	ВТСП материал
Siemens	Германия	2002	Генератор	0,4	1500		96,8	BSCCO
Siemens	Германия	2005	Генератор	4	3600	7	98,7	BSCCO
Converteam/ Zenergy/ E.ON	Германия	2009	Гидрогенератор	1,25	214		> 98	BSCCO
Converteam/ Zenergy	Великобритания	2010	Ветрогенератор	8	12			BSCCO
AMSC/ TECO Westinghouse	США	2012	Ветрогенератор	10	11	120		Не решено

Сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии.

Сверхпроводниковые индуктивные накопители (СПИН) энергоёмкостью 10^8 - 10^9 Дж рассматриваются как одно из эффективных средств повышения устойчивости ЭЭС. На индуктивные накопители энергоёмкостью $\sim 10^9$ Дж могут быть возложены задачи увеличения пределов передаваемой мощности линии по условиям статической и динамической устойчивости, сглаживания нерегулярных колебаний по линиям, связывающим ЭЭС, демпфирования электромеханических процессов в генераторах в послеаварийных режимах, обеспечения режимов глубокого потребления и выдачи реактивной мощности в узел ЭЭС для обеспечения

условий нормализации напряжения и т.д. [21]. Перспективное направление применения данных устройств – повышение надёжности электроснабжения ответственных производств и первичное регулирование частоты и мощности по связям крупных энергообъединений.

Таблица 1.4 – Существующие и проектируемые СПИН [13]

Страна/город	Энергия, МДж	Р _{вых} , МВт	Тип обмотки	Проводник	Дата	T, К	Охлаждение
USA	2,7	1,7	Соленоид	Nb-Ti		4	Жидкий гелий
USA/ Tacoma	30	8	Соленоид	Nb-Ti	1982-1984	4	Жидкий гелий
Japan/ Fukuoka	3,6	1	6 тороидальных катушек	Nb-Ti	1994-2001	4	Жидкий гелий
Korea	3	0,75	Соленоид	Nb-Ti	1999-2003	4	Жидкий гелий
Japan/ Kameyama	7	5	Соленоид	Nb-Ti	2003-2006	4	Жидкий гелий
France	0,8		Галетная обмотка	Bi-2212	2004-2007	20	Криокулер
Korea	0,6	0,45		Bi-2223	2004-2007		
Japan/ Nagoya	1	1	Соленоид	Bi-2212	2004-2006	4	Жидкий гелий
Japan/ Nikko	20	1	Соленоид	Nb-Ti	2004-2008	4	Жидкий гелий
Japan/ Kameyama	20	10	Соленоид	Nb-Ti	2005-2007	4	Жидкий гелий
Japan/ Nagoya	2	1	Галетная обмотка	YBCO	2008-2013	20-40	Теплообменный газ
USA	3,4	0,020		YBCO	2010-	4	
China/ Baiyin	1	0.5		YBCO	2011-		
Korea	2,5		Тороидальный	YBCO	2011-2014	20	Криокулер

Сверхпроводниковые ограничители тока.

Использование ВТСП в устройствах ограничения токов короткого замыкания является одним из наиболее перспективных направлений прикладной сверхпроводимости в области электроэнергетики. Существует довольно много вариантов исполнения сверхпроводниковых ограничителей тока (СОТ): резистивного типа, индуктивного типа, индуктивного типа с насыщенным магнитопроводом, трансформаторного типа, выпрямительного типа.

СОТ резистивного типа самый простой и малогабаритный, и главной особенностью СОТ резистивного типа является включение сверхпроводникового ус непосредственно в схему с защищаемой нагрузкой. СОТ резистивного типа применяются в шунтирующем и последовательном исполнениях [22]. В настоящее время шунтирующий тип СОТ может быть применен в схемах с однократным автоматическим повторным включением (АПВ), но в ближайшее время после некоторых доработок ВТСП катушки и непосредственно самих ВТСП материалов можно будет добиться двукратного АПВ. Параллельное исполнение более эффективно с точки зрения плотности тока в ВТСП резисторе в режиме замыкания и связанными с этим затратами на отвод тепла [22]. На рисунке 1.6 схематически приведена конструкция СОТ резистивного типа.

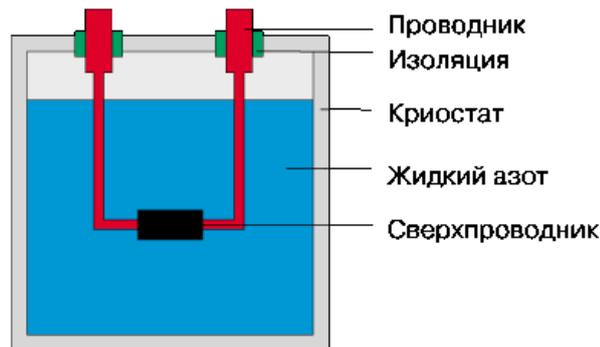


Рисунок 1.6 – Схематичная конструкция СОТ резистивного типа

СОТ трансформаторного типа представляется в виде трансформатора с ВТСП резистором, которым нагружают вторичную обмотку трансформатора (рисунок 1.7) [11].

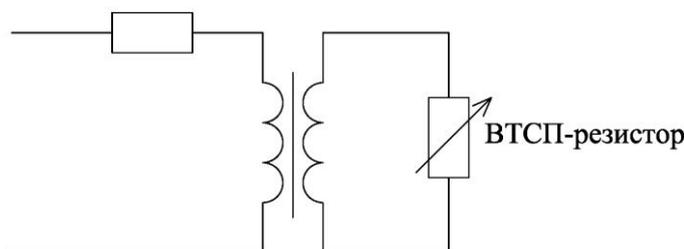


Рисунок 1.7 – Схема замещения СОТ трансформаторного типа

В нормальном режиме работы (нагрузочном) вторичная обмотка трансформатора замкнута на сверхпроводник, сопротивление СОТ близко к нулю. При возникновении короткого замыкания резистор выходит из сверхпроводящего со-

стояния и его сопротивление растет, в результате чего ток КЗ ограничивается индуктивным сопротивлением первичной обмотки. Недостатком СОТ трансформаторного типа являются большие габариты устройства, а также более сложная конструкция и высокая стоимость по сравнению с СОТ резистивного типа, что удержало многих разработчиков от дальнейшего освоения СОТ трансформаторного типа [11].

СОТ выпрямительного типа представляет собой диодный мост, в диагональ которого включена ВТСП катушка индуктивности, через которую протекает только постоянный ток, что немаловажно, т. к. токонесущая способность ВТСП проводов сильно уменьшается при работе на переменных токах. В нормальном режиме работы производная тока в катушке индуктивности постоянна, на ней нет падения напряжения (катушка находится в сверхпроводящем состоянии, следовательно, нет падения напряжения и на ее активном сопротивлении) [12]. В случае КЗ начинается рост тока в катушке индуктивности, на ней начинается падение напряжения, равное напряжению сети, таким образом, происходит ограничение тока КЗ. Скорость роста тока в катушке индуктивности прямо пропорциональна ее индуктивности, ввод тока в катушку происходит по закону, близкому к линейному. СОТ выпрямительного типа в настоящее время активно исследуются в Японии. Дополнительным преимуществом СОТ данного типа является возможность их использования как источников бесперебойного питания в случае замены диодного моста на тиристорный мост, способный работать в качестве инвертора, преобразующего энергию, запасенную в катушке индуктивности в переменный ток [12].

Принцип работы СОТ индуктивного типа состоит в способности сверхпроводника перераспределять магнитное поле.

СОТ со сверхпроводящим экраном состоит из обычной обмотки, через которую протекает ограничиваемый ток, и стального сердечника, между которыми находится криостат с кольцевым ВТСП экраном, который может состоять из нескольких колец. При работе СОТ в номинальном режиме ВТСП экран находится в сверхпроводящем состоянии, препятствуя проникновению магнитного потока в

медную обмотку, стальной сердечник «выключен» и индуктивность СОТ мала. При КЗ ВТСП экран переходит в нормальное состояние, магнитный поток проникает в обмотку, и происходит резкое возрастание индуктивности СОТ. На рисунке 1.8 показана схематичная конструкция СОТ со сверхпроводящим экраном[11].

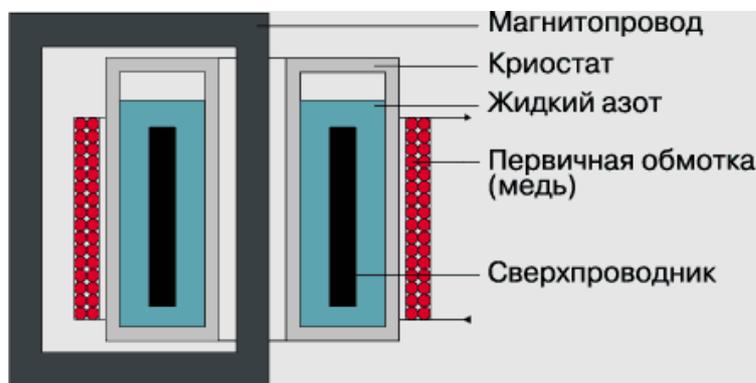


Рисунок 1.8 – Конструкция СОТ со сверхпроводящим экраном

Так фирмой АВВ созданы и испытаны опытные образцы токоограничителя индуктивного типа мощностью 1,2 МВА с ВТСП экраном в 1997 году.

СОТ с насыщенным магнитопроводом состоит из ВТСП катушки подмагничивания, сетевых обмоток и магнитопроводов. ВТСП катушка подмагничивания охватывает магнитопроводы с обычными (медными или алюминиевыми) сетевыми обмотками, включенными последовательно – встречно. Возможно, также и параллельно-встречное включение сетевых обмоток. Катушка подмагничивания служит для того, чтобы насытить магнитопроводы. При этом резко падает индуктивность сетевых обмоток – СОТ работает в номинальном режиме работы. В случае КЗ сетевая обмотка создает напряженность магнитного поля, которая компенсирует напряженность магнитного поля катушки подмагничивания, магнитопроводы выходят из насыщения, индуктивность сетевых обмоток возрастает, происходит ограничение тока. Поскольку требуется ограничение тока КЗ как на положительном, так и на отрицательном полупериодах, необходимо использование пары магнитопроводов и сетевых катушек для каждой фазы [11]. Дальнейшее возрастание тока КЗ приводит к тому, что магнитопроводы снова насыщаются, так как напряженности магнитного поля от катушки подмагничивания не хватает для того, чтобы скомпенсировать напряженности магнитного поля от сетевых обмоток, что накладывает ограничения на максимальный ограничиваемый ток. СОТ

с насыщенным магнитопроводом разрабатывается в РНЦ «Курчатовский институт» с 1997 года.

СОТ с индуктивно связанными катушками состоит из пары индуктивно связанных катушек (одна – из ВТСП, другая – медная). Катушки могут иметь общий сердечник, не обязательный для данного типа СОТ. ВТСП катушка либо соединена с медной катушкой последовательно и зашунтирована нормальным шунтом, либо замкнута накоротко. При КЗ происходит переход ВТСП катушки в нормальное (несверхпроводящее) состояние – индуктивность СОТ резко возрастает и происходит ограничение тока.

Сверхпроводниковые трансформаторы.

Особенностью работ в области ВТСП устройств явилась большая доступность создания и испытания небольших моделей трансформаторов по сравнению с НТСП устройствами, поскольку работа с жидким азотом проще, чем с жидким гелием, и он значительно дешевле. В результате количество участников разработок ВТСП трансформаторов существенно расширился за счет университетов, которые ранее участвовали на этапе НТСП, но самостоятельных серьезных работ не вели. Поэтому ниже рассматриваются наиболее крупные и наиболее известные проекты.

ВТСП трансформаторы по сравнению с традиционными обладают значительными техническими преимуществами, а именно:

- снижение нагрузочных потерь при номинальном токе до 90%, что увеличивает КПД трансформатора;
- уменьшение массогабаритных показателей трансформатора до 40%;
- ограничение токов короткого замыкания, что в аварийных режимах защищает электрооборудование сети;
- большая перегрузочная способность без повреждения изоляции и старения трансформатора;
- уменьшение уровня шума.
- низкие потери холостого хода и короткого замыкания.

Вместе с тем, использование жидкого азота в ВТСП трансформаторах позволит, помимо основной функции хладагента, получить надежную, высокоэффективную изоляцию, отличающейся от обычной традиционной изоляции такими параметрами, как экологическая чистота, нестарение, пожаровзрывобезопасность. При этом мощность, затрачиваемая на охлаждение СПТ, снижается в 20 раз по сравнению с мощностью, затрачиваемой на охлаждение обычных силовых трансформаторов [1].

Разновидность конструкций СПТ и их отдельных элементов значительно шире по сравнению с аналогичными вариантами традиционных силовых трансформаторов. Магнитопровод трансформатора может иметь как «холодное» исполнение (погружен в жидкий азот вместе с обмотками), так и «теплое» исполнение (работает при комнатной температуре). Холодное исполнение, с одной стороны, способствует упрощению конструкции криостата и уменьшению размеров магнитной системы, с другой стороны, вносит дополнительные теплопритоки, увеличивая энергозатраты на охлаждение. Снижения теплопритоков можно достичь использованием в качестве материала магнитопровода аморфных сталей, имеющих очень низкие тепловыделения (0,2 Вт/кг при 1,4 Т и 100 К), или обычной холоднокатаной электротехнической стали с улучшенными характеристиками. Тёплое исполнение магнитопровода приводит к более сложной конструкции криостата, выполняемого в виде полого цилиндра, что увеличивает размер магнитной системы, но вместе с тем уменьшает теплопритоки в холодную часть. При этом в качестве материала магнитопровода можно использовать сравнительно дешёвую тонколистовую рулонную электротехническую сталь.

Обмотки трансформатора могут быть концентрическими или чередующимися и намотаны как проводниками первого поколения, так и проводниками второго поколения. Сверхпроводники имеют две основные особенности: пренебрежимо малые потери при относительно большой плотности тока и «переключающий режим» – переход от нулевого сопротивления к высокому сопротивлению, когда ток превысит критический ток. И, как известно, сверхпроводящее состояние

существует только ниже определенной температуры. Обычно рабочая температура для удобства принимается равной температуре кипящего азота, т.е. 77 К.

Рабочий ток ВТСП проводника должен иметь значительные соответствующие области сверхпроводимости и ниже критического тока. Максимально допустимое повышение тока определяется способностью нагрузки охлаждающего устройства. Для тока, значительно превышающего критическое значение, потери увеличиваются на порядки. Этот режим является режимом ограничения аварийного тока – кратковременным переходным режимом. Энергия, выделенная в проводнике в переходном режиме, будет поглощена при испарении части охлаждающей жидкости [19].

На рисунке 1.9 приведено схематическое устройство трансформатора с теплым магнитопроводом.

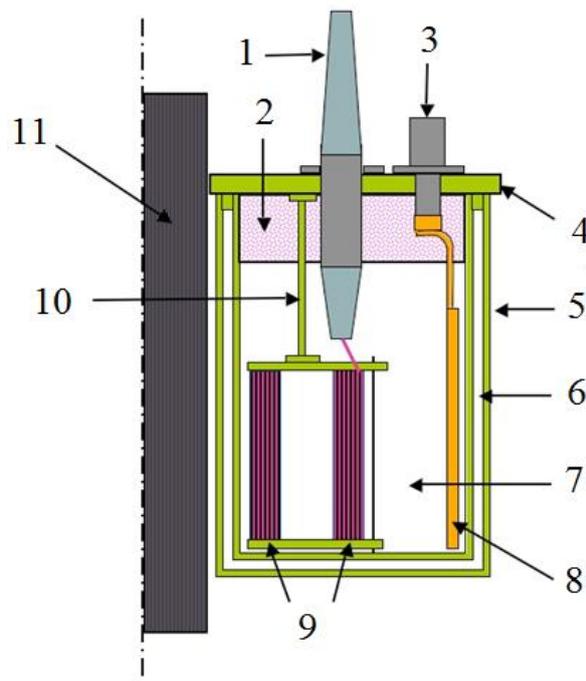


Рисунок 1.9 – Схематическое устройство ВТСП трансформатора: 1 – токоввод первичной обмотки; 2 – газовая подушка; 3 – криокуллер; 4 – крышка; 5 – криостат; 6 – вакуум; 7 – жидкий азот; 8 – охлаждающая оболочка; 9 – обмотки; 10 – поддерживающая трубка; 11 – магнитопровод

В мире активно ведутся исследования по разработке СПТ. Так фирма Siemens стремится использовать возможность изготовления компактного СПТ, имеющего небольшой вес и не имеющего масла для применения на локомотивах. Так

как обычные тяговые трансформаторы имеют высокие потери, применение СПТ оказывается выгодным уже при небольшой мощности.

Другие фирмы, такая как Waukesha Electric привлекает большая перегрузочная способность без старения и небольшие размеры. Фирма АВВ своей целью ставит создание устройства, совмещающего способность ограничения аварийных токов, наличие уменьшенного реактивного сопротивления и низких потерь. Разработка СПТ с токоограничивающей функцией также ведется в Японии [14–16], Германии [17] и Новой Зеландии [18]. По некоторым данным силовой трансформатор с ВТСП обмотками мощностью 100 МВА будет иметь массу 60 т вместо 130 т и меньшие потери (более чем в 3 раза).

Помимо высокой эффективности и других характеристик, важнейшей следует считать низкую стоимость термоизоляции и надежность охлаждающей системы [19]. В качестве изоляции обмоток используется так называемый каптон (полиимидная пленка), обладающий хорошими изоляционными характеристиками и теплопроводностью при малой толщине пленки. Система охлаждения СПТ может быть выполнена как с принудительной циркуляцией жидкого азота, так и с естественной циркуляцией.

В таблице 1.5 приведены основные существующие и реализованные проекты по СПТ с ВТСП обмотками.

Таблица 1.5 – Существующие и проектируемые СПТ [13]

Страна/проект	Возможное прим-ние	U, кВ	Число фаз	S, МВА	T, К	Провод	Дата
Германия/Siemens	ж/д	5,5/1,1	1ф	0,1	77	Bi2223	1996-2001
Япония/Kyushu Univ.	ПС	6,6/3,3	1ф	0,5	77	Bi2223	-1996
Швейцария/ABB	ПС	18,7/0,42	3ф	0,63	77	Bi2223	-1997
Япония/ Fukuoka Consortium	ПС	22/6,9	1ф	1	77	Bi2223	-1998
США/SPI	ПС	13,8/6,9	1ф	1	25	Bi2223	-1998
Япония/ Super-ACE	ПС	66/6,9	1ф	2	66	Bi2223	-2003
Ю.Корея/DAPAS	ПС	22,9/6,6	1ф	1	65	Bi2223	-2004
Япония/RTRI	ПС	25/1,2/0,4	1ф	4	66	Bi2223	-2005

Продолжение таблицы 1.5

Страна/проект	Возможное прим-ние	U, кВ	Число фаз	S, МВА	T, К	Провод	Дата
Китай/ТВЕА	ПС	10,5/0,4	3ф	0,63	77	Bi2223	-2005
Германия/Siemens	ПС	25/1,4	1ф	1	66	Bi2223	-2006
Япония/University of Nagoya	ПС	22/6,6	1ф	2	77	YBCO	-2009
Новая Зеландия/TRST	ПС	11/0,4	3ф	1	70	YBCO Roebel cable	2010-2013
США/Smart Grid Demo.	ПС	69/12,47	3ф	28	70	YBCO	2011-
Китай/Baiyin	ПС	10,5/0,4	3ф	0,63	77	YBCO	2011-

В [1] приведена классификация СПТ энергетического назначения (рисунок 1.10). СПТ конструктивно могут быть выполнены с пульсирующим или вращающимся магнитным полем, с поперечной или продольной намоткой сверхпроводящих витков обмоток. СПТ с пульсирующим магнитным полем могут быть выполнены как с нелокализованным (в пространстве) магнитным полем, так и с локализованным магнитным полем возбуждения и рассеяния. В СПТ традиционного исполнения с пульсирующим магнитным полем с концентрическими и чередующимися первичной и вторичной обмотками в качестве проводникового материала обмоток используется низкотемпературный и высокотемпературный многожильный сверхпроводящий провод (МЖСПП) круглого и прямоугольного сечения. Первичная обмотка таких трансформаторов совмещает в себе функции силовой обмотки и обмотки возбуждения (намагничивания) основного магнитного поля СПТ. Намагничивающая составляющая первичного тока в ней является причиной создания сильного нескомпенсированного магнитного поля возбуждения в зоне силовых СП обмоток, что снижает токонесущую способность этих обмоток и одновременно увеличивает потери в них.

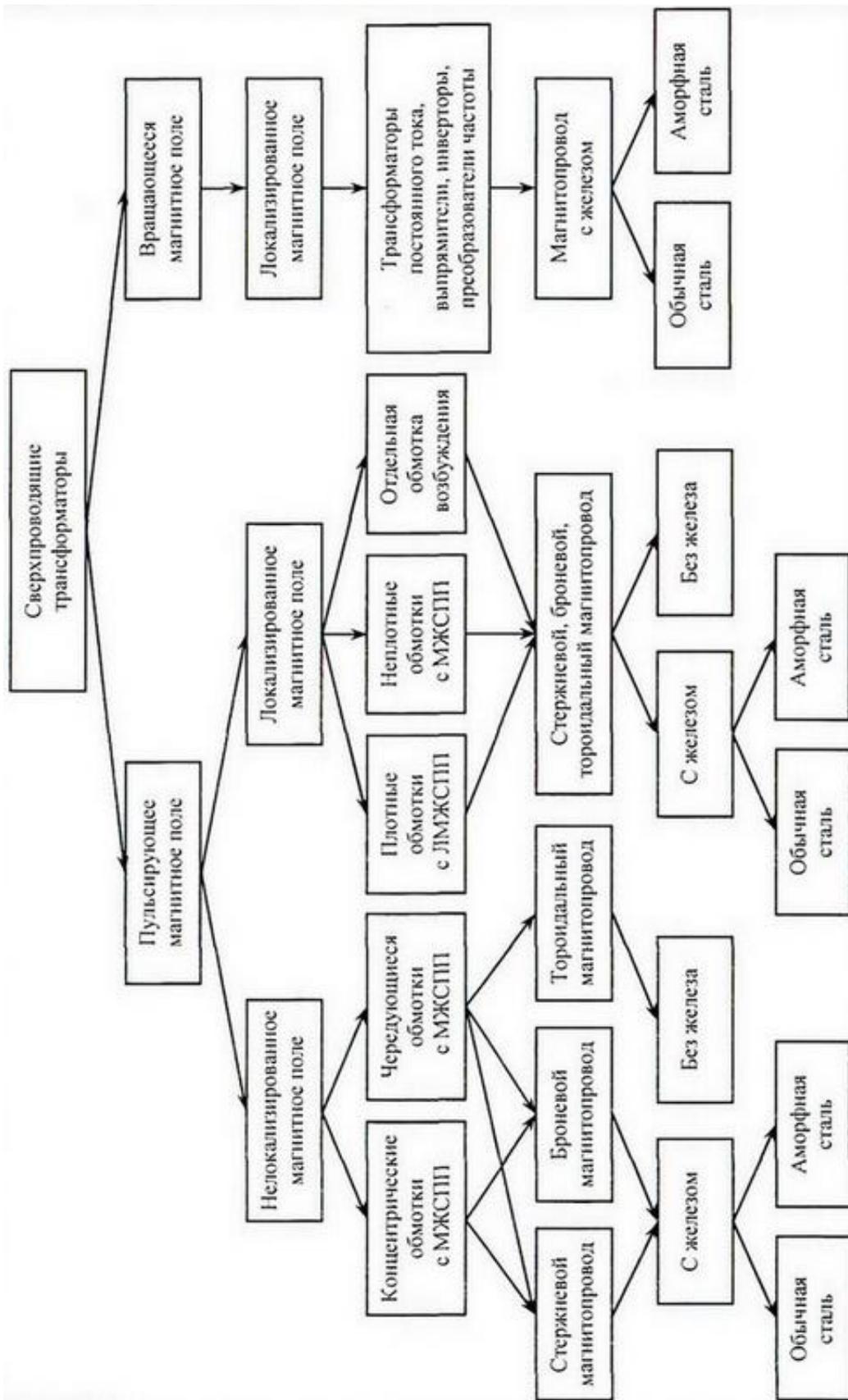


Рисунок 1.10 – Классификация СПТ энергетического назначения

Применением секционирования СП обмоток трансформатора не может быть достигнута полная компенсация магнитных полей в связи с наличием в секциях первичной обмотки СПТ нескомпенсированных ампервитков возбуждения. Вследствие этого, каждая секция СПТ находится в сильном внешнем магнитном поле (в поле ампервитков возбуждения). Для устранения этого недостатка в СПТ с пульсирующим и вращающимся магнитным полем возникает необходимость использования отдельной обмотки возбуждения, в которой протекает реактивный ток возбуждения, создающий сильное магнитное поле. Отдельная обмотка возбуждения конструктивно расположена близко к магнитопроводу СПТ и удалена от силовых первичной и вторичной обмоток, которые не находятся в сильном магнитном поле возбуждения, так как в первичной обмотке СПТ ток возбуждения не протекает. Использование отдельной обмотки возбуждения позволяет локализовать магнитное поле в зоне ее функционирования. При этом магнитное поле резко падает вне обмотки возбуждения, т.е. в области расположения секций силовых СП обмоток трансформатора. Отсутствие тока возбуждения непосредственно в силовых обмотках позволяет создать полностью компенсирующие друг друга первичные и вторичные ампервитки обмоток и уменьшить магнитное поле вокруг этих обмоток, что приведет к уменьшению потерь, увеличению токонесущей способности и мощности СПТ. В СПТ с отдельной обмоткой возбуждения, последняя выполняется автономно на требуемое магнитное поле возбуждения, ее размеры и число витков могут отличаться от тех же параметров первичной силовой обмотки. В отличие от силовых обмоток, обмотка возбуждения может быть изготовлена из другого СП материала, выполнена криорезистивной или из обычного проводникового материала и функционировать в теплой зоне (300 К) вместе с ферромагнитным или неферромагнитным магнитопроводом трансформатора. В зависимости от схемы соединения отдельной обмотки возбуждения, СПТ с локализованным магнитным полем могут быть разделены на СПТ независимого, параллельного и смешанного возбуждения. В СПТ независимого возбуждения отдельная обмотка возбуждения питается от независимого источника реактивной мощности. В СПТ параллельного возбуждения отдельная обмотка возбуждения непосред-

ственно соединена параллельно с первичной силовой обмоткой или имеет с ней автотрансформаторную связь. СПТ смешанного возбуждения имеет две отдельные обмотки возбуждения, которые параллельно и последовательно соединены непосредственно с первичной силовой обмоткой. В этом случае отдельные обмотки возбуждения могут иметь с первичной обмоткой трансформаторную связь. В СПТ с пульсирующим и вращающимся магнитным полем локализация магнитного поля рассеяния силовых обмоток достигается плотной намоткой витков (коэффициент заполнения обмоток $K_{з.об.} = 1$) локализованным многожильным сверхпроводящим проводом (ЛМЖСПП) или неплотной намоткой витков МЖСПП. ЛМЖСПП обладают максимальной токнесущей способностью при минимальных потерях и расходе сверхпроводникового материала. Особенностью такого провода является то, что каждая СП жила в нем находится в собственном магнитном поле, создаваемом током самой жилы и локализованном в ее окрестности. Взаимное влияние внешних магнитных полей, создаваемых токами остальных СП жил, в ЛМЖСПП сведено к минимуму. Поэтому токнесущая способность каждой СП жилы провода определяется собственным магнитным полем и ее собственными параметрами. Оптимальной формой ЛМЖСПП следует считать цилиндрическую форму провода. СПТ с плотными силовыми обмотками, в качестве проводникового материала витков которых могут быть использованы ЛМЖСПП, наиболее полно будут удовлетворять основным требованиям, предъявляемым к сверхпроводящему электроэнергетическому оборудованию нового поколения, значительно улучшат энерго- и ресурсосберегающие показатели СПТ традиционного исполнения [1].

Неплотные силовые обмотки СПТ с МЖСПП выполняются с шагом намотки витков, определяемым из условия максимального ослабления магнитной связи между витками. Каждый виток обмотки в таком СПТ находится в собственном, локализованном в его окрестности, магнитном поле, создаваемом протекающим через него током. Отсутствие внешнего магнитного поля, создаваемого остальными витками СП обмотки трансформатора, резко увеличивает токнесущую способность витка и всей обмотки, существенно уменьшает потери в них.

СПТ с неплотно выполненными силовыми обмотками с МЖСПП также имеют преимущества перед СПТ традиционного исполнения, но уступают по технико-экономическим показателям перспективным СПТ с плотными обмотками с ЛМЖСПП.

СПТ с вращающимся магнитным полем выполняются с локализованным магнитным полем возбуждения и рассеяния. Такие СПТ могут быть использованы для преобразования величины уровня напряжения, частоты, числа фаз. Локализованное магнитное поле в них, по аналогии с СПТ с пульсирующим магнитным полем, достигается применением отдельной обмотки возбуждения, плотных силовых обмоток с ЛМЖСПП или неплотных силовых обмоток с МЖСПП. Вращающееся магнитное поле возбуждения может быть создано не только с помощью трехфазного переменного тока, но и постоянным электрическим током при пространственном переключении элементов СП обмотки на основе бесконтактного полупроводникового переключателя [1].

Сверхпроводящие обмотки СПТ с вращающимся магнитным полем конструктивно выполняются по аналогии с замкнутыми обмотками электрических машин. Замкнутая распределенная СП обмотка трансформатора состоит из последовательно соединенных секций, витки которых располагаются на цилиндрической поверхности железного магнитопровода в пазах. Каждая секция такой обмотки соединяется с соответствующим полупроводниковым переключателем управляемых полупроводниковых коммутаторах (УПК).

СПТ с вращающимся магнитным полем могут быть выполнены многообмоточными. При этом УПК могут быть присоединены отдельно к первичным или вторичным обмоткам, а также к обеим обмоткам СПТ. К СПТ с вращающимся магнитным полем относится СПТ постоянного тока, назначением которого является преобразование постоянного напряжения одной величины (большей или меньшей) с помощью УПК.

Применение бесконтактных, регулируемых СПТ постоянного тока открывает широкие перспективы для использования их в электроэнергетических системах постоянного тока.

На основе СПТ с вращающимся магнитным полем могут быть выполнены выпрямители для преобразования, с помощью полупроводниковых переключателей, входящих в УПК, переменного m -фазного напряжения (обычно $m = 3$) в постоянное регулируемое напряжение. Назначением инверторов на основе СПТ с вращающимся магнитным полем является преобразование постоянного напряжения в переменное m -фазное напряжение, осуществленное также полупроводниковыми переключателями, входящими в УПК [1].

Трехфазные преобразователи частоты на основе СПТ с вращающимся магнитным полем предназначены для преобразования трехфазного напряжения одной частоты в напряжение другой частоты [1]. Как и в случае с трансформаторами постоянного тока, выпрямителями и инверторами, такое преобразование осуществляется с помощью полупроводниковых переключателей, входящих в трехфазный УПК.

СПТ с пульсирующим магнитным полем выполняются с магнитопроводом стержневой, броневой или тороидальной конструкции, с железом или без него. В случае выполнения магнитопровода без железа, в СПТ с пульсирующим магнитным полем возникает необходимость применения отдельной обмотки возбуждения для создания основного магнитного поля трансформатора.

1.4. Криогенная техника для охлаждения сверхпроводниковых устройств

Коэффициент полезного действия криогенных установок неизменно улучшается на протяжении многих лет. Однако, КПД криоустановок для ВТСП устройств, так называемых криокулеров, как правило, составляет менее 20 %. КПД цикла Карно равен

$$\eta_C = \frac{T_2}{T_1 - T_2}, \quad (1.1)$$

где T_1 - температура окружающей среды (300К); T_2 - рабочая температура (77К).

В идеальном случае, когда КПД криокулера равен 100%, $\eta_C = 34,5\%$. Как правило, КПД криокулеров не превышает 20%, следовательно, общий КПД системы охлаждения равен $\eta \approx 7\%$.

Криокулеры, работающие в температурном диапазоне от 4 до 80 К, делятся на 2 группы:

– рекуперативные (стационарное течение), примерами являются установки, использующие циклы Джоуля – Томпсона, Брайтона, Клода.

– регенеративные (пульсирующее течение), примерами являются установки с циклами Стирлинга, Гиффорда-МакМагона, пульсационные трубы.

Последние представляют наибольший интерес с точки зрения применения в силовых электротехнических устройствах.

На данный момент чрезвычайно перспективными представляются работы по созданию пульсационных труб, работающих по циклу Стирлинга, что позволит достичь более высокого КПД, чем для криокулеров, работающих по циклу Гиффорда-МакМагона. В США и Японии проектируются пульсационные трубы с холодопроизводительностью при 77 К в 5 кВт и даже в 20 кВт [23].

Компания Stirling Cryogenics предлагает широкий модельный ряд криокулеров с механическим приводом, работающих по циклу Стирлинга, КПД которых более чем в 1,5 раза выше, чем у криокулеров, работающих по циклу Гиффорда-МакМагона. Отличительной особенностью криокулеров Stirling Cryogenics является их модульная конструкция, если криокулер типа LPC-1RL состоит из одного модуля с холодопроизводительностью в 1 кВт при температуре 77 К, то криокулер LPC-8RL включает в себя восемь таких модулей, и его холодопроизводительность при 77 К достигает 8 кВт. За счет модульности достигается удобство в монтаже и техническом обслуживании [23]. Компания Stirling Cryogenics разработала несколько семейств криокулеров с различными рабочими температурами и схемами охлаждения, что позволяет найти оптимальное криогенное решение для охлаждения практически любого ВТСП электротехнического устройства. Семейство криокулеров LPC FF предназначено для создания систем циркуляционного охлаждения, в которых жидкий азот с температурой 65-77 К под давлением прокачивается через охлаждаемый криостат. Помимо криокулера в состав системы циркуляционного охлаждения входят буферный бак, газификатор и криогенный

насос для создания избыточного давления (рисунок 1.11). Криокулеры LPC FF успешно используются для охлаждения нескольких ВТСП кабелей [23].



Рисунок 1.11 – Внешний вид системы циркуляционного охлаждения Stirling LPC-2 FF (1700 Вт при 77 К)

Криокулеры серий LPC RL и LPC T RL используются для реконденсации азота и неона. Криокулеры LPC T RL выполнены в двухступенчатом исполнении, за счет чего достигается рабочая температура в диапазоне 26-36 К (для серии LPC RL рабочая температура составляет 65-77 К). Конструктивно обе серии криокулеров достаточно близки, с охлаждаемым криостатом они соединяются через криогенный трубопровод большого сечения, по которому испарившийся газ поступает в реконденсатор криокулера, а сжиженный газ самотеком стекает обратно в криостат. Криокулеры серии LPC RL широко используются для охлаждения ВТСП токоограничителей и других ВТСП устройств с рабочей температурой 65-77 К [23].

Последняя разработка Stirling Cryogenics – криокулеры серии GPC предназначены для охлаждения до температуры 20-30 К путем принудительной циркуляции теплообменного газа (гелий). Криокулеры серии GPC имеют двухступенчатое исполнение, каждая из ступеней заканчивается теплообменником для охлаждения теплообменного газа, циркуляция которого по двум замкнутым контурам осуществляется при помощи криогенных насосов. Температура теплообменного газа в первом контуре составляет 80 К, а во втором – 20-30 К. Криокулеры серии

GPC предназначены для охлаждения сверхпроводниковых электрических машин и трансформаторов.

В таблице 1.6 приведены основные характеристики криокулеров различных производителей, для криокулеров двухступенчатого исполнения указано два значения. Для криокулеров Stirling Cryogenics указаны характеристики самой маломощной и самой мощной модели в серии (параметры в скобках).

Таблица 1.6 – Характеристики криокулеров

Марка криокулера	Рабочая температура	Холодопроизводительность	Потребляемая мощность
Cryomech AL600	80 К	620 Вт	15,5 кВт
Q-drive 2S362K	77 К	1000 Вт	21 кВт
Stirling cryogenics LPC-1FF(LPC-8FF)	77 К	750 Вт (7400 Вт)	12 кВт (98 кВт)
Stirling cryogenics LPC-1RL(LPC-8RL)	77 К	1000 Вт (8000 Вт)	11 кВт (88 кВт)

Мощность криокулера определяется суммарными теплопритоками в криостат и тепловыделениями в самом криостате из-за потерь на гистерезис и вихревые токи. Уменьшение теплопритоков в криостат достигается за счет совершенствования тепловой изоляции, представляющей собой комбинацию тепловых экранов и вакуумирования. Оптимизация теплопритока в криостат через опорные и поддерживающие части достигается за счет уменьшения их сечения и использования материалов с небольшой теплопроводностью.

Теплопритоки через токовводы составляют значительную часть от суммарных теплопритоков, поэтому токовводы обычно изготавливаются из бронзы, обладающей меньшей теплопроводностью по сравнению с медью.

1.5. Выводы

1. Открытие ВТСП впервые с момента открытия явления сверхпроводимости создало серьезные перспективы для широкомасштабного использования сверхпроводимости в большой энергетике.

2. Наиболее подходящим СП проводом для использования в трансформаторах на данный момент является ВТСП провод второго поколения на основе иттриевой керамики, который обладает максимальной плотностью тока и относительно устойчив в сильных электромагнитных полях.

3. В различных научных центрах активно ведутся исследования по использованию ВТСП в электроэнергетике. Испытанные прототипы показали свою состоятельность с технической точки зрения и позволили уточнить характеристик проводов, которые должны быть достигнуты для трансформаторов, имеющих экономические, технические и экологические преимущества.

4. Однако, исследований, посвященных влиянию СПТ на ЭЭС, в частности на электромагнитные и электромеханические переходные процессы, было проведено мало или не проведено вообще.

2. НАГРУЗОЧНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

2.1. Постановка задачи

Потери активной мощности в обмотках сверхпроводникового трансформатора имеют меньшее значение, чем в трансформаторе традиционного исполнения. Необходимо рассмотреть потери, возникающие в СПТ, механизмы их возникновения, и провести сравнение с потерями в традиционном трансформаторе.

При использовании ВТСП проводов в обмотках СПТ изменяются их габариты. Как следствие изменяется энергия магнитного поля рассеяния, заключенная в обмотках, что в свою очередь сказывается на реактивное сопротивление трансформатора. Необходимо оценить изменение реактивного сопротивления СПТ относительно традиционного трансформатора с медными обмотками.

Для оценки влияния СПТ на нормальные режимы работы необходимо оценить влияние СПТ на уровень напряжения, на перетоки мощностей, величину потерь и т.д. Также необходимо рассмотреть на изменение массогабаритных показателей трансформатора в случае использования СПТ.

2.2. Параметры схемы замещения сверхпроводникового трансформатора

Трансформаторы имеют значительные сопротивления и влияют на потери энергии в сети, на отклонения напряжения у потребителей и поэтому должны учитываться при расчетах и анализах работы электрических сетей.

Средством, облегчающим исследование электромагнитных процессов в электротехнических устройствах, является схема замещения, которая отражает физические процессы, протекающие в устройстве. На рисунке 2.1 приведена Г-образная схема замещения трансформатора, наиболее часто используемая в практических расчетах установившихся режимов ЭЭС.

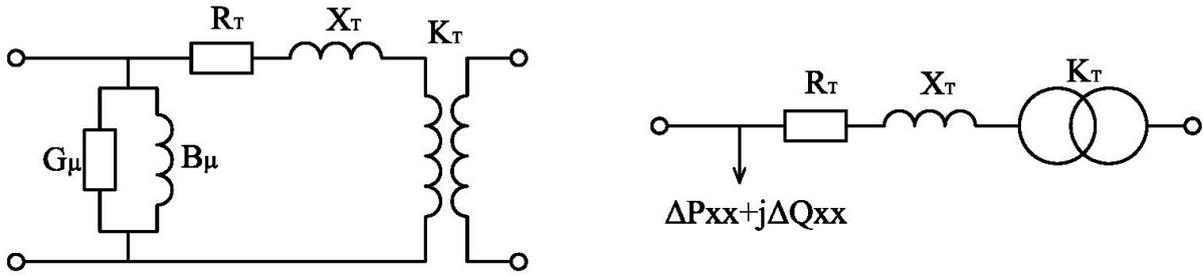


Рисунок 2.1 – Г-образная схема замещения трансформатора

На схеме замещения активное сопротивление R_T отражает тепловыделения при протекании тока по проводам обмоток трансформатора, X_T – индуктивное сопротивление рассеяния, зависящее от геометрических параметров обмоток, активная проводимость G_μ отражает потери активной мощности в магнитной системе трансформатора, реактивная проводимость B_μ пропорциональна намагничивающей мощности трансформатора. Уточним параметры схемы замещения сверхпроводникового трансформатора.

Сверхпроводники обладают нулевым активным сопротивлением в сверхпроводящем состоянии, поэтому активное сопротивление в схеме замещения сверхпроводникового трансформатора равно нулю $R_T = 0$.

Как было показано в п. 1.2 толщина ВТСП ленты второго поколения обладают малой толщиной (около 1 мм) при большой плотности тока, на 2 порядка превышающей плотность тока в обычном медном проводе. Это приводит к тому, что при намотке витков обмотка СПТ становится более узкой по сравнению с обмоткой традиционного трансформатора [24]. Т.е. обмотка СПТ занимает меньший объем. Определим уменьшение индуктивного сопротивления СПТ относительно индуктивного сопротивления обычного трансформатора в предположении равенства числа витков обмоток, поперечного сечения стержня магнитопровода и высоты витка обмотки.

На рисунке 2.2 приведен схематичный вид обмотки низкого напряжения (НН), высокого напряжения (ВН) и диаграмма распределения индукции поля рассеяния.

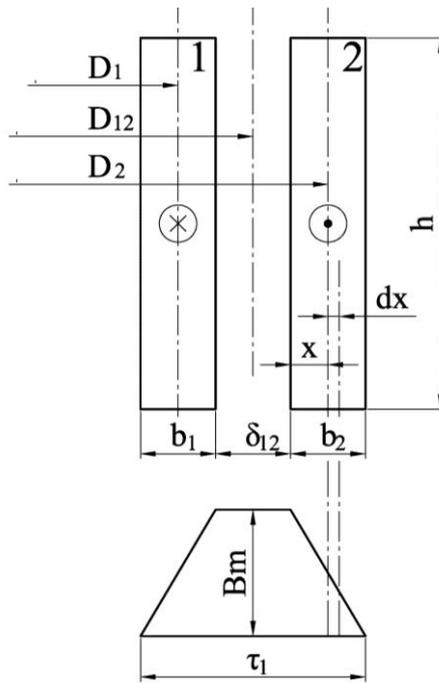


Рисунок 2.2 – К расчету индуктивного сопротивления трансформатора
Индуктивное сопротивление рассеяния определяется выражением [25]

$$X_{T.M} = \frac{2\pi f \mu_0 \pi w^2 \rho_1}{h} \left(D_{12} \delta_{12} + \frac{b_1 D_1 + b_2 D_2}{3} \right), \quad (2.1)$$

где f - частота;

w - число витков;

ρ_1 - коэффициент Роговского;

D_{12} - диаметр средней линии между первичной и вторичной обмотками;

δ_{12} - зазор между первичной и вторичной обмотками;

b_1 - ширина первичной обмотки;

D_1 - средний диаметр первичной обмотки;

b_2 - ширина вторичной обмотки;

D_2 - средний диаметр вторичной обмотки;

h - высота обмотки.

Для СПТ индуктивное сопротивление обозначится

$$X_{T.СП} = \frac{2\pi f \mu_0 \pi w^2 \rho_{1СП}}{h} \left(D_{12СП} \delta_{12} + \frac{b_{1СП} D_{1СП} + b_{2СП} D_{2СП}}{3} \right). \quad (2.2)$$

В предположении равенства тока, протекающего по витку обмотки и в предположении того, что используется провод с прямоугольным сечением

$$I = j_M \cdot S_{np.M} = j_{cn} \cdot S_{np.cn} = j_M a_{np.M} b_{np.M} = j_{cn} \cdot a_{np.cn} b_{np.cn},$$

где j_M и j_{cn} - плотности тока в медном и СП проводах соответственно;

$a_{np.M}$ и $a_{np.cn}$ - высота медного и СП проводов соответственно;

$b_{np.M}$ и $b_{np.cn}$ - ширина медного и обычного провода.

Полагая, что $a_{np.cn} = a_{np.M}$

$$\frac{j_{cn}}{j_M} = k = \frac{b_{np.M}}{b_{np.cn}}, \quad (2.3)$$

где k показывает степень увеличения плотности тока.

Тогда

$$\begin{aligned} \frac{X_{T.M}}{X_{T.СП}} &= \frac{2\pi f \mu_0 \pi w^2 \rho_1 h}{2\pi f \mu_0 \pi w^2 \rho_{1СП} h} \left(\frac{3D_{12M} \delta_{12} + b_{1M} D_{1M} + b_{2M} D_{2M}}{3D_{12СП} \delta_{12} + b_{1СП} D_{1СП} + b_{2СП} D_{2СП}} \right) = \\ &= \frac{\rho_1}{\rho_{1СП}} \left(\frac{3D_{12M} \delta_{12} + b_{np.M} \cdot n_{сл.у1} D_{1M} + b_{np.M} \cdot n_{сл.у2} D_{2M}}{3D_{12СП} \delta_{12} + b_{np.cn} \cdot n_{сл.у1} D_{1СП} + b_{np.cn} \cdot n_{сл.у2} D_{2СП}} \right) = \\ &= \frac{\rho_1}{\rho_{1СП}} \left(\frac{3D_{12M} \delta_{12} + b_{np.cn} \cdot k \cdot n_{сл.у1} D_{1M} + b_{np.cn} \cdot k \cdot n_{сл.у2} D_{2M}}{3D_{12СП} \delta_{12} + b_{np.cn} \cdot n_{сл.у1} D_{1СП} + b_{np.cn} \cdot n_{сл.у2} D_{2СП}} \right), \end{aligned}$$

здесь $n_{сл.у1}$ и $n_{сл.у2}$ число слоев по ширине в первой и второй обмотках соответственно.

В силу того что $D_{12M} \approx D_{1M} \approx D_{2M} \approx D_{12СП} \approx D_{1СП} \approx D_{2СП}$

$$\frac{X_{T.M}}{X_{T.СП}} = \frac{\rho_1}{\rho_{1СП}} \left(\frac{3\delta_{12} + b_{np.cn} \cdot k \cdot n_{сл.у1} + b_{np.cn} \cdot k \cdot n_{сл.у2}}{3\delta_{12} + b_{np.cn} \cdot n_{сл.у1} + b_{np.cn} \cdot n_{сл.у2}} \right) \approx k \quad (2.4)$$

Таким образом, индуктивное сопротивление СПТ уменьшается пропорционально увеличению плотности тока. Как известно, чем выше номинальное напряжение и больше мощность трансформатора, тем выше напряжение короткого замыкания: мощные трансформаторы с напряжением 110-500 кВ – в пределах 10-15% [26]. В СПТ этот параметр при численном решении равен 3-6% для соответствующих мощностей традиционных трансформаторов. С одной стороны, умень-

шение индуктивного сопротивления приводит к увеличению уровней токов короткого замыкания, которые необходимо снижать. Но с другой, величину тока КЗ, протекающего через СПТ, можно снизить использованием функции ограничения тока КЗ, за счет «переключающего режима» сверхпроводника, обусловленного резко нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) ВТСП провода. Данный вопрос исследуется ниже.

Параметры поперечной ветви схемы замещения СПТ имеют несколько меньшее значение в силу общего уменьшения габаритов трансформатора, и зависит в частности от варианта исполнения криостата (рисунок 2.3).

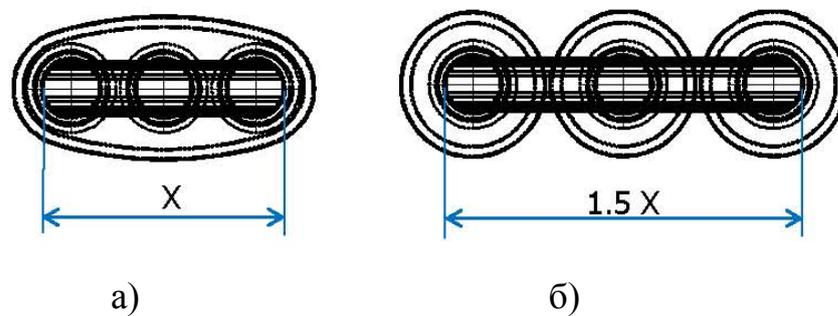


Рисунок 2.3 – Варианты исполнения криостатов

Использование отдельных криостатов для каждой фазы приводит к увеличению размеров магнитной системы, и, как следствие, к увеличению потерь в стали. Общий криостат на все три фазы уменьшает размер магнитной системы, уменьшая при этом потери в стали.

Стоит отметить, что в последнее время в качестве материала магнитопровода стали использовать аморфную электротехническую сталь, обладающую существенно меньшими потерями.

2.3. Векторная диаграмма сверхпроводникового трансформатора и влияние на уровень напряжения

T-образная схема замещения трансформатора, более подробно описывающая электромагнитные процессы в трансформаторе, приведена на рисунке 2.4.

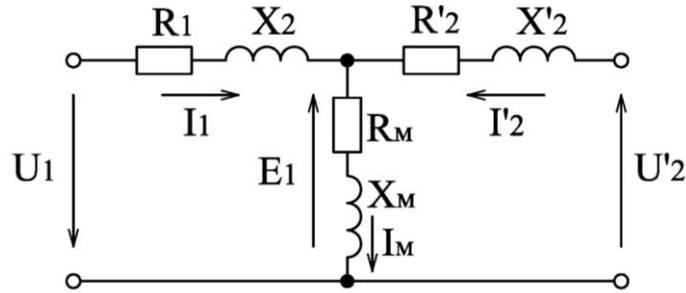


Рисунок 2.4 – Т-образная схема замещения трансформатора

На основании схемы замещения можно записать уравнения трансформатора, представляющие собой баланс напряжений и электродвижущих сил (ЭДС), которые действуют в каждой обмотке [27]

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (R_1 + jX_1)\dot{I}_1 + (R_M + jX_M)(\dot{I}_1 + \dot{I}'_2) = (R_1 + jX_1)\dot{I}_1 + (-\dot{E}_1), \\ -\dot{U}'_2 &= (R'_2 + jX'_2)\dot{I}'_2 + (R_M + jX_M)(\dot{I}_1 + \dot{I}'_2) = -\dot{E}_1 + (R'_2 + jX'_2)\dot{I}'_2. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Уравнения трансформатора могут быть решены аналитическим или графическим методом. Графический метод решения основан на построении векторных диаграмм. Он является более наглядным и часто используется для качественного анализа различных режимов работы трансформатора.

В целях придания векторной диаграмме практического назначения, в силовых трансформаторах, работающих в режимах близких к номинальной нагрузке, пренебрегают током I_M , т.е. считают, что $I_1 = -I_2$. При таком допущении схема замещения трансформатора приобретает вид, приведенный на рисунке 2.5 [28].

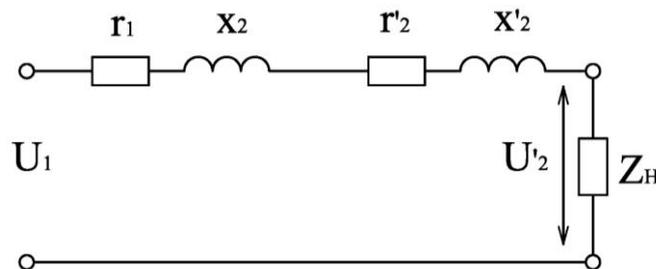


Рисунок 2.5 – Упрощенная схема замещения трансформатора

Схема представляет собой простейшую цепь, состоящую из последовательно соединенных сопротивлений: $Z_1 = r_1 + jx_1$, $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$, Z_H . Напряжение на выводах трансформатора

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \Delta\dot{U}, \quad (2.6)$$

где $\Delta\dot{U}$ – падение напряжения на трансформаторе.

Соответственно упрощенной схеме замещения на рисунке 2.6 построены упрощенные векторные диаграммы при активно-индуктивной нагрузке.

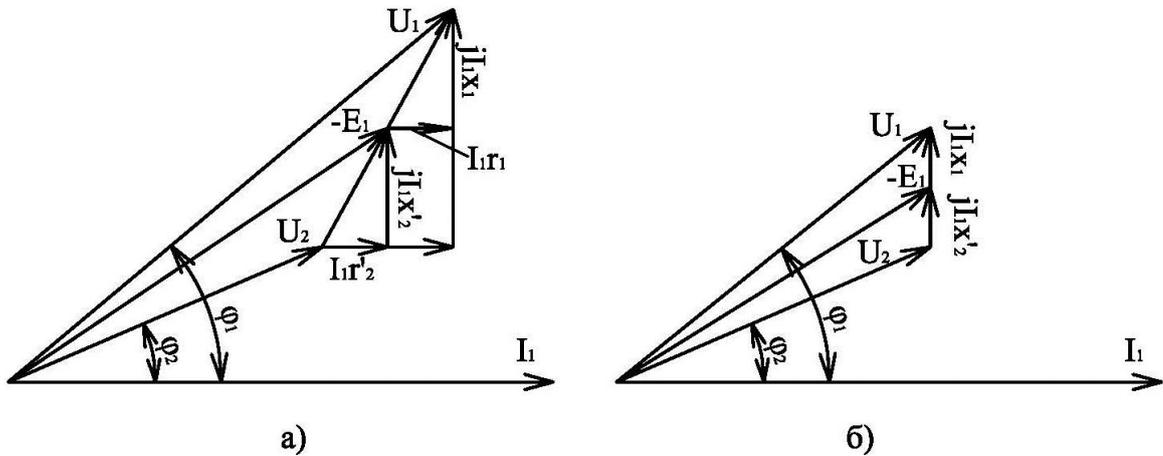


Рисунок 2.6 – Упрощенные векторные диаграммы обычного трансформатора(а) и СПТ(б)

Из диаграмм видно, что в случае со сверхпроводниковым трансформатором падение напряжения имеет меньшее значение из-за отсутствия активного сопротивления и меньшего значения индуктивного сопротивления, что положительно сказывается на уровне напряжения.

Зависимость напряжения на вторичной обмотке трансформатора от тока нагрузки $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$ называется внешней характеристикой. Из (2.6) следует, что с изменением тока во вторичной обмотке (тока нагрузки I_2) напряжение на вторичной обмотке изменяется. Значение напряжения на вторичной обмотке определяется в большей степени не падением напряжения, а потерей напряжения в обмотках. Потеря напряжения есть арифметическая разность между первичным и приведенным вторичным напряжением и определяется по выражению

$$U'_2 = U_1 - \Delta U'_2 = U_1 - I_1(R_T \cos(\varphi_2) + X_T \sin(\varphi_2)). \quad (2.7)$$

На рисунке 2.7 показаны внешние характеристики для обычного трансформатора и СПТ с $U_{кз.м} = 10,5\%$ и $U_{кз.СП} = 5\%$ соответственно при $\cos \varphi = 0,8$.

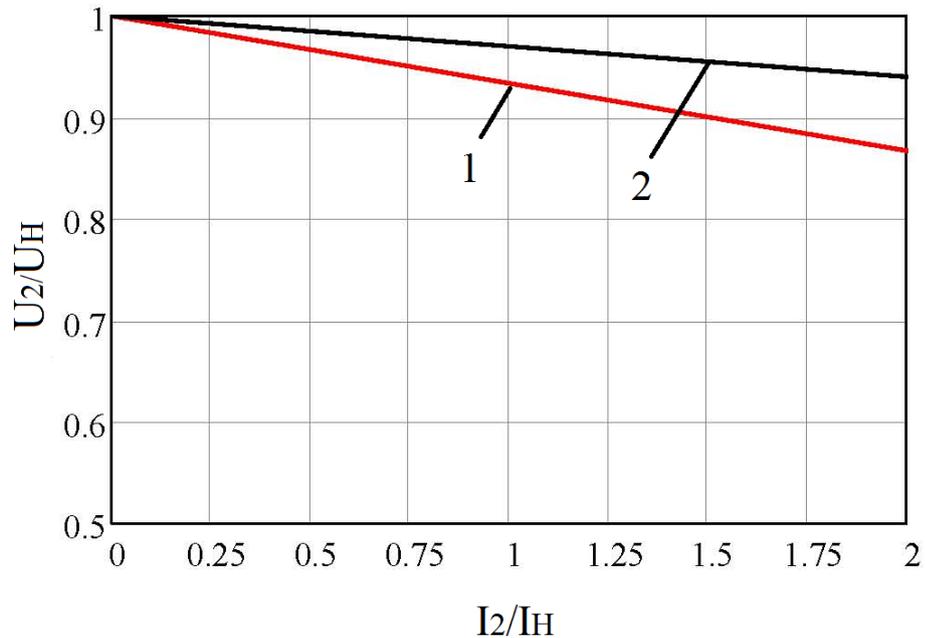


Рисунок 2.7 – Внешние характеристики обычного трансформатора (1) и СПТ(2)

На величину падения напряжения также влияет характер нагрузки (активно-индуктивный, активно-емкостной). На рисунке 2.8 приведена зависимость изменения напряжения трансформатора мощностью 40 МВА от характера нагрузки.

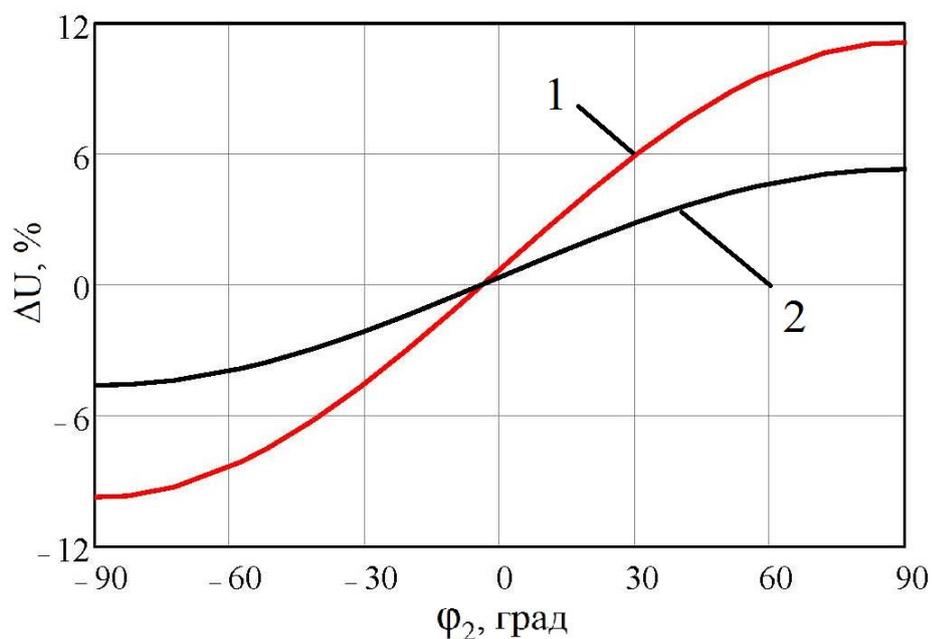


Рисунок 2.8 – Изменение напряжения в зависимости от характера нагрузки для обычного трансформатора(1) и для СПТ(2)

Таким образом, СПТ положительно влияет на уровень напряжений, вызывая меньшее падение напряжения. Или другими словами в случае с СПТ изменяется

коэффициент трансформации трансформатора (уменьшается). Это обстоятельство позволяет либо отказаться от использования устройства регулирования под нагрузкой (РПН) либо использовать устройство РПН с меньшим количеством ответвлений.

При изменении коэффициента трансформации одного трансформатора изменяются как первичное, так и вторичное напряжения. Обычно первичное напряжение изменяется незначительно, т.к. его изменение связано только с изменением потока реактивной мощности в трансформаторе. Если коэффициент трансформации повышающего трансформатора изменяется так, что выпуск реактивной мощности в сеть растет, то напряжение на высшей стороне увеличивается незначительно. Изменение потока реактивной мощности только в одном трансформаторе не может существенно изменить напряжение в основной сети. Напряжение на вторичной стороне заметно изменится в соответствии с изменением коэффициентом трансформации. Массовое изменение коэффициента трансформации может существенно изменить уровень напряжений в основной сети. Одновременной массовое и одинаковое изменение коэффициента трансформации у всех повышающих и понижающих трансформаторов приводит к лишь незначительному изменению вторичных напряжений при существенном изменении первичных напряжений в сети. При массовом внедрении трансформаторов с измененным коэффициентом трансформации необходимо исходить из поддержания на вторичной стороне оптимального напряжения [29].

2.4. Потери в сверхпроводниковом трансформаторе

При протекании переменного тока по ВТСП проводу в последнем возникают различные потери. Существуют теории и инженерные формулы для описания этих потерь, например [30] и [31]. Также существует методика, описанная в [32], для проводов круглого сечения. Все эти теории объединяет то, что потери зависят от направления и величины переменного магнитного поля и от протекающего тока. Рассмотрим основные составляющие потерь в СПТ с обмотками на основе ВТСП проводов второго поколения

Переменное магнитное поле вызывает потери в ВТСП проводах. В зависимости от источника магнитного поля потери могут быть разделены на потери от собственного поля и потери от внешнего поля. Потери от собственного поля вызываются собственным магнитным полем протекающего тока, а потери от внешнего поля вызываются полями рассеяния обмоток.

В качестве формулы для вычисления потерь от собственного поля может быть использована формула, приведенная в [33]

$$\Delta P_{СП1}(I_t) = \frac{I_c \mu_0 f}{\pi} \left(\left(1 - \frac{I_t}{I_c} \right) \cdot \ln \left(1 - \frac{I_t}{I_c} \right) + \left(1 + \frac{I_t}{I_c} \right)^2 - \left(\frac{I_t}{I_c} \right)^2 \right), \quad (2.8)$$

где $\Delta P_{СП}$ - потери от собственного поля; I_t - транспортный ток; I_c - критический ток; μ_0 - магнитная проницаемость вакуума; f - частота.

Транспортный ток I_t - максимальный ток в каждом проводнике. Для первичной обмотки

$$I_t = I_{ВН\max} / n_{ВН},$$

где $I_{ВН\max}$ - максимальный ток в первичной обмотке; $n_{ВН}$ - число проводов в витке.

Стоит отметить, что выражение (2.1) приведено для единичного провода. В витке, набранном из параллельных проводов, меняется распределение магнитного поля внутри витка и реальные потери отличаются от потерь, вычисленных по формуле (2.1). Полные потери от собственного поля

$$\Delta P_{СП} = 3(n_{слВН} \cdot k \cdot \Delta P_{СП1}(I_{tВН}) + n_{слВН} \cdot k \cdot \Delta P_{СП1}(I_{tВН})), \quad (2.9)$$

где $n_{слВН}$ и $n_{слВН}$ - число слоев в первичной и вторичной обмотках соответственно; k - коэффициент, учитывающий увлечение потерь при параллельной намотке проводов.

В [34] показано изменение потерь в зависимости от конструкции, числа параллельных проводов, так для 25 параллельных проводов потери увеличиваются в 50 раз. На рисунке 2.9 приведена зависимость коэффициента увеличения потерь от числа параллельных проводов.

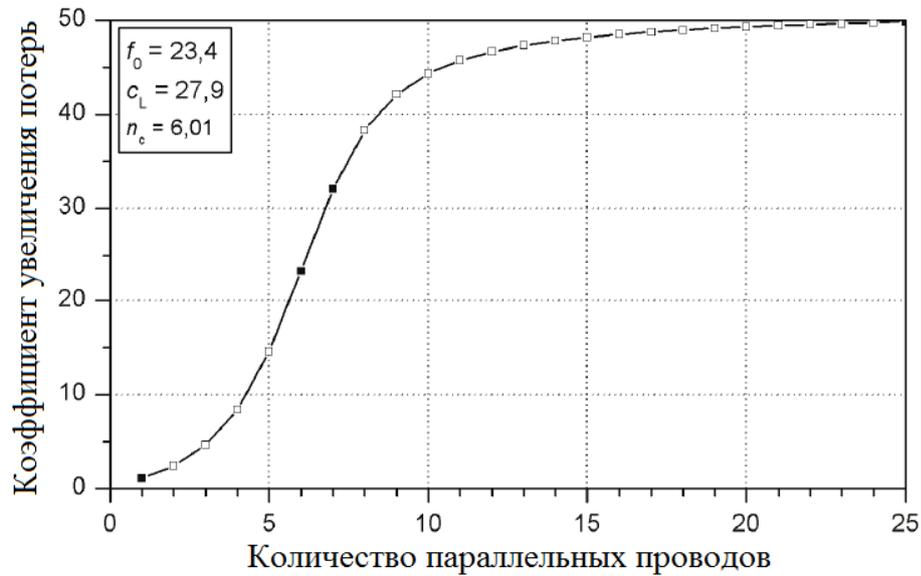


Рисунок 2.9 – Зависимость коэффициент увеличения потерь от числа проводов, намотанных параллельно [34]

Переменное магнитное поле вызывает потери от внешнего поля в ВТСП проводах. Вследствие большой анизотропии, магнитное поле, перпендикулярное поверхности ВТСП ленты (см. рисунок 2.10) приводит к значительно бóльшим потерям, чем потери, создаваемые параллельным полем, и носят превалирующий характер.

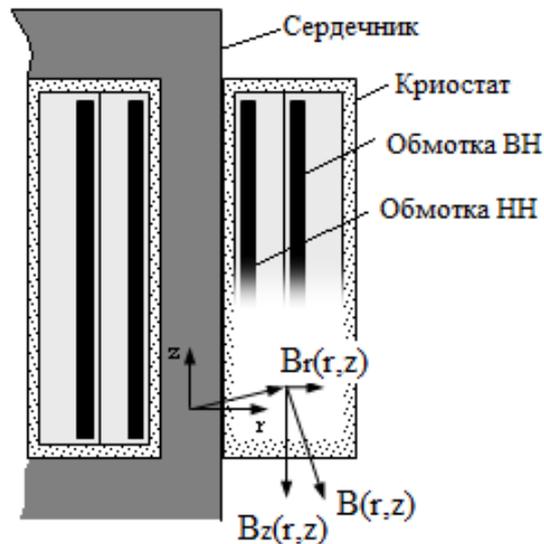


Рисунок 2.10 – К определению составляющих магнитного поля

Потери на гистерезис от внешнего поля, созданные перпендикулярной составляющей, определяются выражением [35] (на единицу длины)

$$\Delta P_{ВП,r}(B_r(r,z)) = \frac{f\pi b^2 (B_r(r,z))^2}{\mu_0} \left(\frac{B_r(r,z)}{B_p} \right), \quad (2.10)$$

$$g(x) = \frac{1}{x} \pi \left(\frac{2}{x} \ln(\cosh(x)) - \tanh(x) \right),$$

здесь b - ширина образца; $B_C = \mu_0 I_C / (\pi b)$ - критическое поле.

Для определения потерь на гистерезис в сверхпроводниках в продольном поле используется выражение [36]

$$\Delta P_{ВП,z}(B_z(r,z)) = \begin{cases} \frac{2ftb(B_z(r,z))^3}{3\mu_0 B_p}, & (B_z(r,z)) \leq B_p \\ \frac{2ftb(3B_z(r,z) - 2B_p)}{3\mu_0 B_p}, & (B_z(r,z)) > B_p, \end{cases} \quad (2.11)$$

где $B_p = \mu_0 j_C t$, здесь t - толщина ВТСП ленты.

Потери на вихревые токи, наведенные в нормальных слоях ВТСП провода вычисляются по выражению [37]

$$\Delta P_{ВП,Вихр}(B_r(r,z)) = \frac{\pi^2 (fB_r(r,z))^2 b^3 d_S}{6\rho_s}. \quad (2.12)$$

Вихревыми потерями, вызванными продольной составляющей поля можно пренебречь из-за формы проводов.

Общие потери от внешнего магнитного поля как сумма потерь в каждом витке обмотки

$$\Delta P_{ВП} = \sum_i \sum_j [l_B(r_i, z_j) (\Delta P_{ВП,r}(B_r(r_i, z_j)) + \Delta P_{ВП,z}(B_z(r_i, z_j)) + \Delta P_{ВП,Вихр}(B_r(r_i, z_j)))] ,$$

где l_B - длина витка.

Теплопритоки в криостат трансформатора через вводы вычисляются по выражению

$$Q_{Ввод} = \frac{I^2}{A_{Ввод}} \int_0^L \rho_{Ввод}(x) dx + A_{Ввод} \lambda_{Ввод}(T) \frac{dT}{dx}, \quad (2.13)$$

где I - ток, протекающий по вводам;

L - длина ввода;

$\rho_{Ввод}$ - удельное сопротивление ввода;

$A_{Ввод}$ - площадь поперечного сечения;

$\lambda_{Ввод}$ - коэффициент теплопроводности материала ввода;

T - температура.

Нужно отметить, что через стенки криостата также происходят теплопритоки. Согласно [33] теплопритоки для криостата, выполненного из стеклопластика, составляют около 2 Вт/м^2 .

Суммарные потери в СПТ

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{СТ} + \frac{(\Delta P_{ВП}(I) + \Delta P_{СП}(I) + \Delta P_{Ввод}(I) + \Delta P_{Криостат})}{\eta_{Криокулер}}, \quad (2.14)$$

где $\eta_{Криокулер}$ - КПД криокулера.

Расчет потерь в СПТ представляет собой довольно трудную задачу и в целях упрощения целесообразно задаваться некоторой простой функцией. Так в [38] приведены выражения для отыскания потерь в СПТ относительно потерь в обычном трансформаторе.

Потери в традиционном трансформаторе при номинальной нагрузке равны 1 о.е.

$$\Delta P(P) = 0,91P^2 + 0,09, \quad (2.15)$$

здесь P - нагрузка, протекающая через трансформатор;

0,09 – потери холостого хода.

Для СПТ относительно потерь в традиционном трансформаторе [38]

$$\Delta P(P) = 0,149P^3 - 0,091P^2 + 0,012P + 0,08, \quad (2.16)$$

здесь P - нагрузка, протекающая через трансформатор;

0,08 – потери холостого хода.

На рисунке 2.11 показаны зависимости потерь в обычном и сверхпроводниковом трансформаторах, полученные по (2.15) и (2.16).

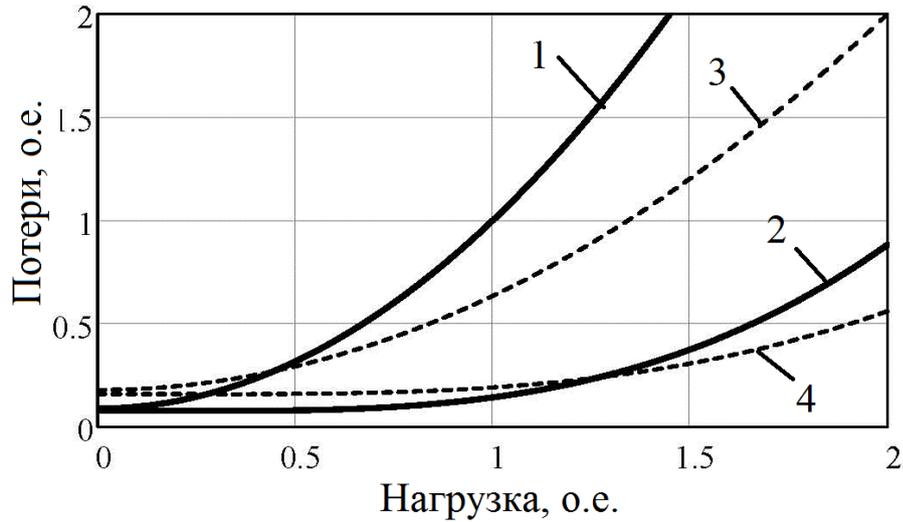


Рисунок 2.11 – Потери в обычном и СП трансформаторах: 1 – обычный трансформатор; 2 – СПТ; 3 – два обычных трансформатора; 4 – два СПТ

Нагрузка, при которой целесообразно отключать один из трансформаторов определяется условием равенства потерь мощности при k и $k-1$ трансформаторах. Потери для $k-1$ трансформаторов

$$\Delta P_T = (k-1)\Delta P_{XX} + \frac{1}{k-1} \frac{\Delta P_K S^2}{S_{НОМ}^2}.$$

Граница интервалов находится как точка пересечения кривых для k и $k-1$ трансформаторов. Граничная мощность [39]

$$S_K = S_{НОМ} \sqrt{\frac{\Delta P_{XX} k(k-1)}{\Delta P_K}}$$

Очевидно, что если в случае использования обычных трансформаторов экономически выгоднее использование 2-х трансформаторов при коэффициенте загрузки 0,5-0,6 о.е, то в случае использования СПТ экономически выгоднее использование 2-х трансформаторов при большем значении коэффициента загрузки. Причем, потери в одном СПТ могут быть меньше, чем потери в двух обычных трансформаторах (при коэффициенте загрузки ≥ 1)

2.5. Параллельная работа с обычным трансформатором

Для параллельной работы двух трансформаторов требуется равенство напряжений короткого замыкания, первичных и вторичных напряжений,

тождественность групп соединений обмоток. Как было показано выше СПТ обладает меньшим импедансом. Достичь равенства напряжений короткого замыкания СПТ и традиционного трансформатора возможно было бы созданием дополнительного канала рассеяния. Однако, эта мера приводит к снижению величины критического тока, из-за увеличения поля рассеяния, что, следовательно, делает нецелесообразным использование данной меры [40]. Более того, необходимо максимально уменьшать поле рассеяния для повышения экономического эффекта от использования СП проводов в качестве обмоточного материала. Таким образом, параллельная работа СПТ и традиционного трансформатора становится невозможной. В этой связи наиболее целесообразным представляется способ работы, при котором в нормальном режиме включен СПТ, а обычный трансформатор отключен (рисунок 2.12).

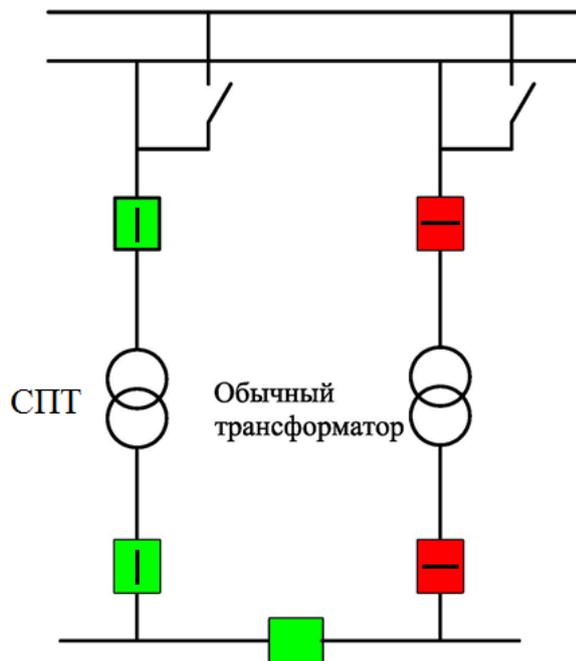


Рисунок 2.12 – Параллельная работа СПТ и обычного трансформатора

Включение обычного трансформатора производится при возникновении проблем, связанных с возвратом СПТ после устранения короткого замыкания или иных проблем. Очевидно, что установка СПТ на подстанции с двумя трансформаторами целесообразна при замене старого трансформатора, выработавшего эксплуатационный срок службы или при замене поврежденного трансформатора.

2.6. Сравнительный анализ габаритных показателей

Удельная единичная мощность трансформатора ограничивается массой, размерами, условиями транспортировки. Так, для крупных трансформаторов с напряжением ВН 500 кВ приходится изготавливать однофазные трансформаторы в целях транспортабельности трансформатора.

СПТ позволяют по-иному взглянуть на данную проблему, т.к. использование сверхпроводников позволяет снизить массогабаритные показатели трансформатора. Проведем сравнение габаритных показателей СПТ и обычного трансформатора с позиции ЭДС витка трансформатора, т.к. данный параметр непосредственно влияет на объем используемых материалов в трансформаторе. Сравнение проведем для активных частей трансформатора, т.е. для магнитопровода и обмоток.

ЭДС витка трансформатора определяется следующим выражением [41]

$$u_B = 4,44 f B_C P_C, \quad (2.17)$$

где f - частота;

B_C - индукция в стержне;

P_C - площадь поперечного сечения стержня.

Откуда площадь поперечного сечения стержня

$$P_C = \frac{u_B}{4,44 f B_C}. \quad (2.18)$$

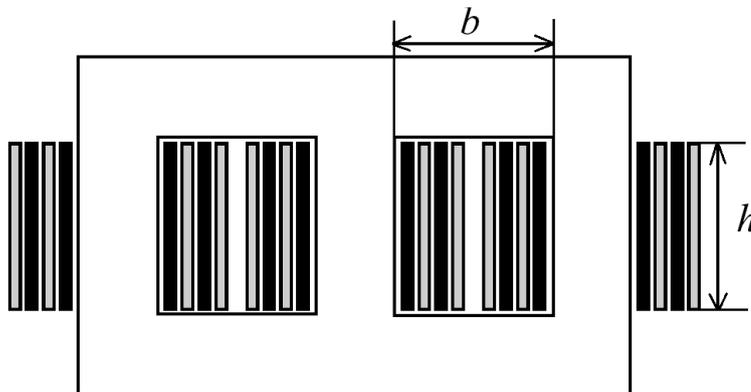


Рисунок 2.13 – К расчету габаритов активной части трансформатора

Объем магнитопровода, в предположении равенства поперечного сечения стержня и ярма равен

$$V_{CT} = P_C \left(3h + 4b + 6\sqrt{\frac{4P_C}{\pi}} \right). \quad (2.19)$$

Площадь поперечного сечения витка

$$P_B = \frac{I}{j}, \quad (2.20)$$

где I - номинальный ток;

j - плотность тока.

Тогда объем обмоток

$$V_{OB} = 3 \left(\frac{I_1 N_1}{j} 2\pi \left(\sqrt{\frac{4P_C}{\pi}} + \frac{a_1 b}{10} \right) + \frac{I_2 N_2}{j} 2\pi \left(\sqrt{\frac{4P_C}{\pi}} + \frac{a_2 b}{10} \right) \right), \quad (2.21)$$

где N - число витков;

a_1 и a_2 - коэффициенты, показывающие удаленность от края окна магнитопровода до центра соответственно первичной и вторичной обмоток.

Коэффициенты a_1 и a_2 для каждого трансформатора имеют свое значение и рассчитывались отдельно для каждого случая.

Для трансформатора мощностью 40 МВА ориентировочный диаметр стержня составляет $d = 0,6$ м, и при индукции в стержне 1,5 Т ЭДС витка равен $u_B = 94$ В. Для трансформатора мощностью 80 МВА $d = 0,6$ м, $u_B = 130$ В. Для трансформатора мощностью 125 МВА $d = 0,6$ м, $u_B = 130$ В.

Общий объем активной части трансформатора

$$V_T = V_{OB} + V_{CT}.$$

На рисунках 2.14 и 2.15 приведены зависимости объема активных частей СПТ и обычного трансформаторов от ЭДС витка. Зависимости приведены для трех мощностей 40 МВА, 80 МВА, 125 МВА с соотношением напряжений 115/11 кВ.

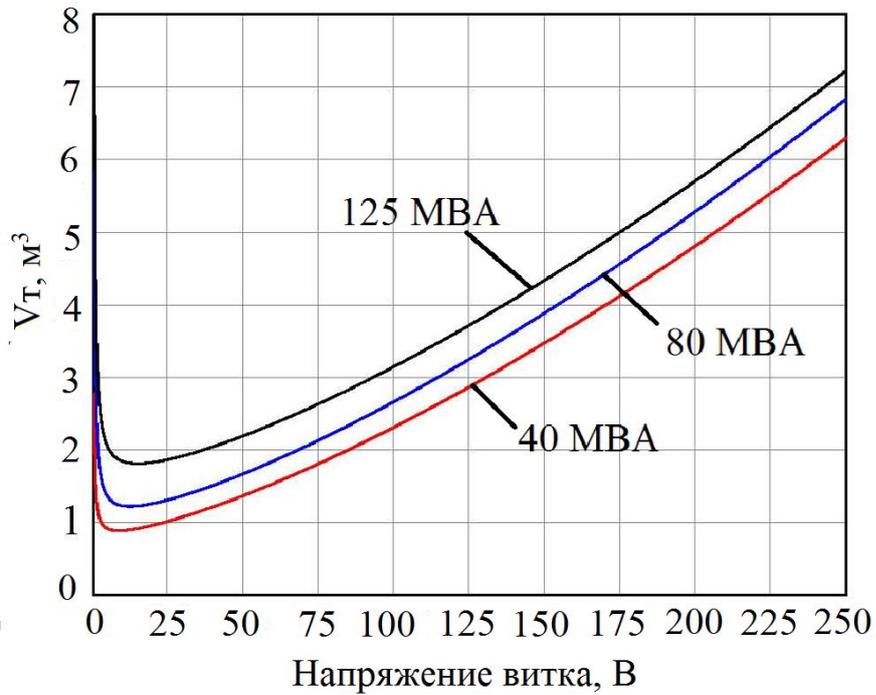


Рисунок 2.14 – Зависимость объема СПТ от ЭДС витка ³

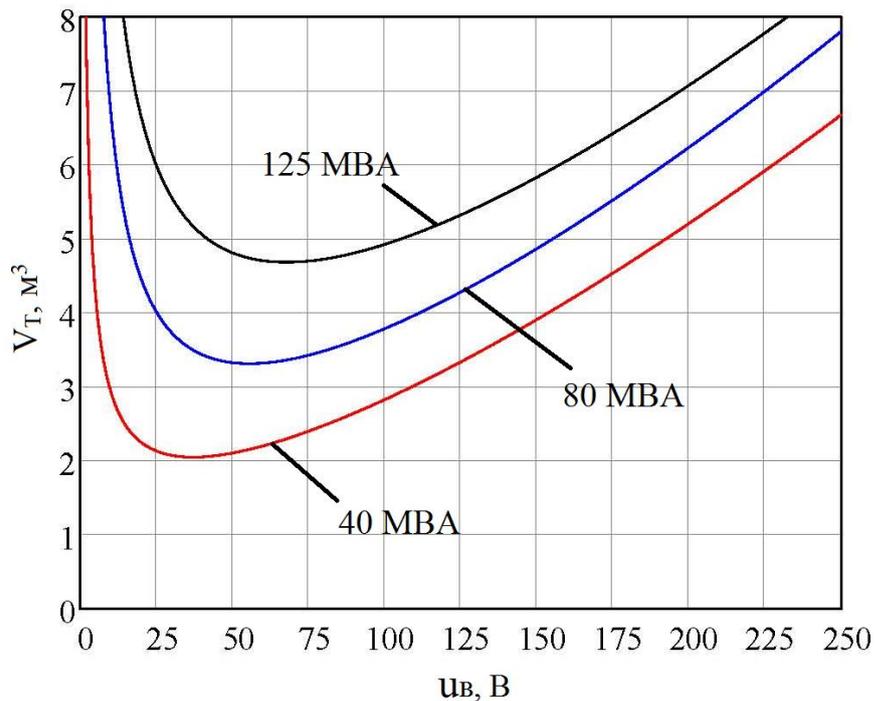


Рисунок 2.15 – Зависимость объема обычного трансформатора от ЭДС витка

Из рисунков видно, что в случае использования СП обмоток объем активной части трансформатора уменьшается на одну треть. В дополнении к этому необходимо отметить, что в случае с СПТ уменьшается объем охлаждающей жидкости вследствие того, что в жидкий азот погружены только обмотки, а маг-

нитепровод функционирует при комнатной температуре. Следовательно, масса СПТ снижается примерно вдвое.

Также, из рисунков видно, что СПТ возможно оптимизировать с позиции наименьшего расхода СП материалов, что позволяет снизить цену СПТ.

2.7. Расчет нагрузочного режима

В качестве примера по нагрузочному режиму рассмотрим схему электрической сети, которая рассчитывается в курсовом проекте при изучении дисциплины «Электрические системы и сети». Схема сети приведена на рисунке 2.16

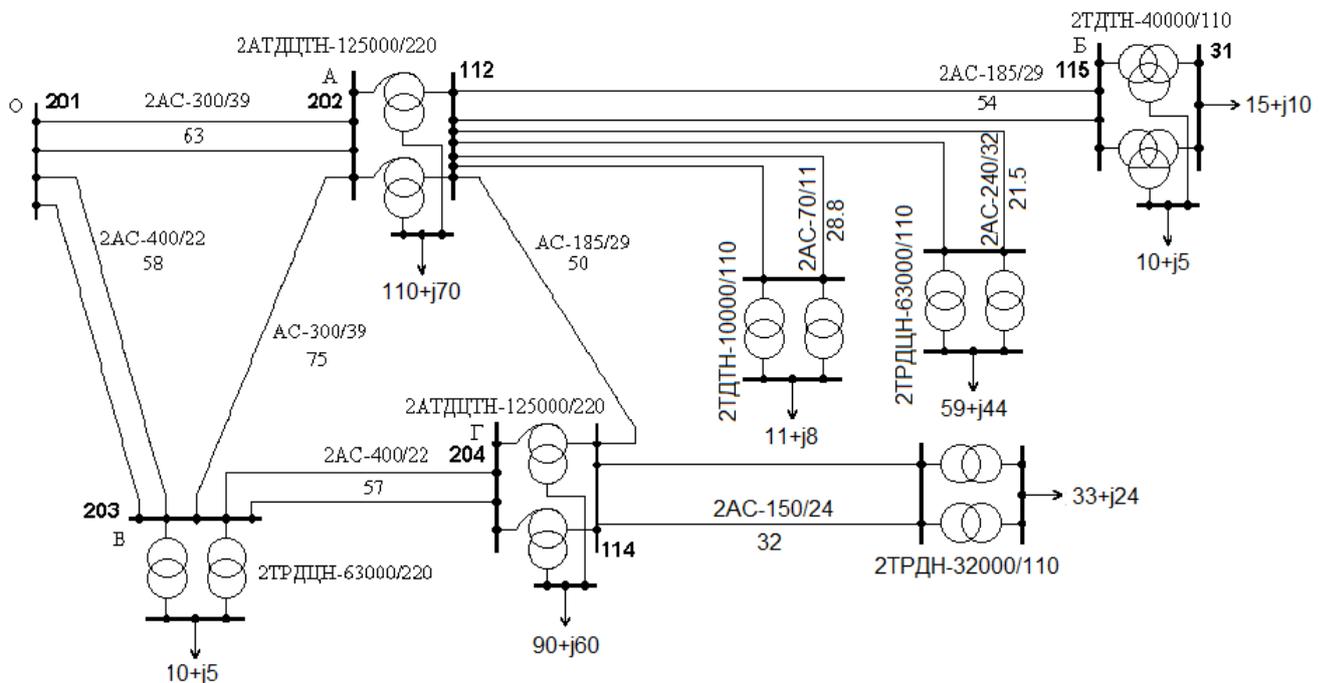


Рисунок 2.16 – Схема электрической сети

Расчет электрической сети производится в программе расчета потокораспределения NET v 1.1, НГТУ, каф. АЭЭС. Исходные данные, вводимые в программу, и результаты расчетов приведены ниже.

В случае использования обычных трансформаторов.

Параметры расчетной схемы существующей сети
(файл network/dat)

S - балансирующий (3), N - узлы нагрузки (1) и генерации (2)
(U в кВ, P в МВт, Q в Мвар, G и B в мкСм)

	№	pr	Us	Ps	Qs	Gs	Bs
S	201	3	242	0	0	0	0
N	202	1	220	0	0	0	0
N	203	1	220	80.4	60.4	0	0
N	204	1	220	0	0	0	0

N	112	1	110	110.6	93	0	0
N	114	1	110	90.4	75.8	0	0
N	115	1	110	0	0	0	0
N	31	1	35	25.4	18.3	0	0
N	11	12	110	0.064	0.48	0	0
N	1	12	10	33	24	0	0
N	12	12	110	0.118	0.82	0	0
N	2	12	10	59	44	0	0
N	13	12	110	0.028	0.14	0	0
N	3	12	10	11	8	0	0

L - линии электропередачи (R в Ом, X в Ом, B в мкСм)

	N1	N2	R	X	B
L	201	202	3.1	13.5	333
L	201	203	2.2	12.2	313
L	202	203	7.4	32.2	198
L	203	204	2.1	12.0	308
L	112	115	4.4	11.2	300
L	112	114	8.1	20.7	138
L	112	12	1.3	4.35	120.4
L	112	13	6.17	6.39	146.7
L	114	11	3.17	6.72	172.7

Т - Трансформаторы (R в Ом, X в Ом, Ун в кВ, Ув в кВ)

	N1	N2	R	X	Ун	Ув
T	112	202	0.5	29.6	121	230
T	114	204	0.5	29.6	121	230
T	31	115	0.4	17.8	38.5	115
T	1	11	0.95	21.7	10.5	115
T	2	12	0.4	11	10.5	115
T	3	13	3.95	69.45	11	115

Р е з у л ь т а т ы п о у з л а м :

N	V	dV	P	Q	Pg	Qb
201	242.000	0.000	-422.6794	-385.6359	0.0000	-0.0000
202	228.172	-2.195	-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000
203	230.089	-2.298	80.4000	60.4000	0.0000	-0.0000
204	222.170	-3.812	-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000
112	106.160	-9.424	110.6000	93.0000	0.0000	-0.0000
114	108.053	-8.712	90.4000	75.8000	0.0000	-0.0000
115	103.049	-10.491	-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000
31	33.337	-12.975	25.4000	18.3000	0.0000	-0.0000
11	105.312	-9.402	0.0640	0.4800	0.0000	-0.0000
1	9.088	-13.195	33.0000	24.0000	0.0000	-0.0000
12	103.274	-10.431	0.1180	0.8200	0.0000	-0.0000
2	8.938	-14.012	59.0000	44.0000	0.0000	-0.0000
13	104.981	-9.514	0.0280	0.1400	0.0000	-0.0000
3	9.436	-13.570	11.0000	8.0000	0.0000	-0.0000

Баланс по пассивным элементам (+ нагрузка, - генерация):
12.6694 60.6959 0.0000 0.0000

Р е з у л ь т а т ы п о в е т в я м :

N1	N2	P12	Q12	P21	Q21	DP
201	202	-203.5290	-194.3878	199.1304	193.6520	4.398602
201	203	-219.1504	-191.2480	215.8373	190.3264	3.313012
202	203	0.1771	18.6947	-0.2032	-8.4128	0.026065
203	204	-135.2341	-121.5136	133.8418	129.3115	1.392370
112	115	-25.8490	-17.8182	25.4395	20.0593	0.409453
112	114	9.2530	6.8231	-9.3408	-5.4643	0.087803
112	12	-60.0830	-52.1905	59.3441	51.0387	0.738829
112	13	-11.2140	-7.9402	11.1031	9.4604	0.110924
114	11	-33.7502	-27.2772	33.2237	28.1270	0.526490
112	202	198.4930	164.1257	-199.3075	-212.3467	0.814545
114	204	133.4909	108.5415	-133.8418	-129.3115	0.350845
31	115	25.4000	18.3000	-25.4395	-20.0593	0.039535
1	11	33.0000	24.0000	-33.1597	-27.6470	0.159660
2	12	59.0000	44.0000	-59.2261	-50.2187	0.226136
3	13	11.0000	8.0000	-11.0751	-9.3204	0.075096

Суммарные потери активной мощности: 12.669364 МВт
Сеть состоит из 15 узлов, и 13 ветвей.

В случае использования сверхпроводниковых трансформаторов.

Параметры расчетной схемы существующей сети
(файл network/dat)

S - балансирующий (3), N - узлы нагрузки (1) и генерации (2)
(U в кВ, P в МВт, Q в Мвар, G и B в мкСм)

	№	pr	Us	Ps	Qs	Gs	Bs
S	201	3	242	0	0	0	0
N	202	1	220	0	0	0	0
N	203	1	220	80.4	60.4	0	0
N	204	1	220	0	0	0	0
N	112	1	110	110.6	93	0	0
N	114	1	110	90.4	75.8	0	0
N	115	1	110	0	0	0	0
N	31	1	35	25.4	18.3	0	0
N	11	12	110	0.064	0.48	0	0
N	1	12	10	33	24	0	0
N	12	12	110	0.118	0.82	0	0
N	2	12	10	59	44	0	0
N	13	12	110	0.028	0.14	0	0
N	3	12	10	11	8	0	0

L - линии электропередачи (R в Ом, X в Ом, B в мкСм)

	N1	N2	R	X	B
L	201	202	3.1	13.5	333
L	201	203	2.2	12.2	313
L	202	203	7.4	32.2	198
L	203	204	2.1	12.0	308
L	112	115	4.4	11.2	300
L	112	114	8.1	20.7	138
L	112	12	1.3	4.35	120.4
L	112	13	6.17	6.39	146.7
L	114	11	3.17	6.72	172.7

T - Трансформаторы(R в Ом, X в Ом, Uн в кВ, Uв в кВ)

	N1	N2	R	X	Uн	Uв
T	112	202	0.	14.8	121	230
T	114	204	0.	14.8	121	230
T	31	115	0.	8.9	38.5	115
T	1	11	0.	10.85	10.5	115
T	2	12	0.	6.5	10.5	115
T	3	13	0.	34.72	11	115

Р е з у л ь т а т ы п о у з л а м :

N	V	dV	P	Q	Pg	Qb
201	242.000	0.000	-419.2103	-328.3718	0.0000	-0.0000
202	229.743	-2.316	-0.0001	-0.0001	0.0000	-0.0000
203	231.595	-2.265	80.4000	60.3999	0.0000	-0.0000
204	225.070	-3.670	-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000
112	114.813	-5.821	110.6004	92.9995	0.0000	-0.0000
114	114.778	-5.811	90.4001	75.7998	0.0000	-0.0000
115	112.090	-6.752	-0.0002	-0.0000	0.0000	-0.0000
31	37.026	-7.797	25.4001	18.2999	0.0000	-0.0000
11	112.350	-6.448	0.0638	0.4800	0.0000	-0.0000
1	10.037	-8.109	33.0001	23.9999	0.0000	-0.0000
12	112.295	-6.693	0.1176	0.8200	0.0000	-0.0000
2	10.010	-8.478	59.0002	43.9996	0.0000	-0.0000
13	113.782	-5.922	0.0278	0.1400	0.0000	-0.0000
3	10.640	-7.651	11.0000	8.0000	0.0000	-0.0000

Баланс по пассивным элементам (+ нагрузка, - генерация):
9.2005 3.4333 0.0000 0.0000

Р е з у л ь т а т ы п о в е т в я м :

N1	N2	P12	Q12	P21	Q21	DP
201	202	-206.7279	-165.8631	202.8333	167.4415	3.894676
201	203	-212.4824	-162.5087	209.6792	164.5231	2.803182
202	203	4.2832	17.4526	-4.3067	-7.0197	0.023533

203	204	-124.9725	-97.1035	123.9264	107.1865	1.046146
112	115	-25.7286	-15.9877	25.3999	19.0130	0.328679
112	114	0.0323	0.7028	-0.0323	1.1157	0.000027
112	12	-59.7057	-48.1637	59.1177	47.7491	0.587923
112	13	-11.1141	-6.8320	11.0279	8.6591	0.086285
114	11	-33.4939	-24.6588	33.0639	25.9747	0.430068
112	202	207.1165	163.2801	-207.1165	-184.8942	0.000000
114	204	123.9264	99.3429	-123.9264	-107.1865	0.000000
31	115	25.4001	18.2999	-25.4001	-19.0130	0.000000
1	11	33.0001	23.9999	-33.0001	-25.4946	0.000000
2	12	59.0002	43.9996	-59.0002	-46.9292	0.000000
3	13	11.0000	8.0000	-11.0000	-8.5191	-0.000000

Суммарные потери активной мощности: 9.200519 МВт

Из результатов расчетов видно, что в случае использования СПТ снижаются потери как активной, так и реактивной мощности, повышается уровень напряжения. В узлах нагрузок можно добиться желаемого напряжения без помощи устройств регулирования напряжения. Проведенный расчет показывает, что влияние СПТ на нагрузочные режимы работы значительно.

2.8. Выводы

1. Сверхпроводниковые трансформаторы, в силу конструктивных особенностей, связанных с архитектурой СП проводов, обладают меньшими индуктивными сопротивлениями. Как следствие, данное обстоятельство вызывает меньшее падение и потерю напряжения на трансформаторе.

2. Активное сопротивление СПТ равно нулю, однако, необходимы затраты мощности на поддержание низкой температуры, или другими словами, на отвод тепла из криогенной области температур в область комнатной температуры.

3. Показано, что потери в одном СПТ могут быть меньше чем потери в двух обычных трансформаторах.

4. Выполнена оценка массогабаритных показателей СПТ, которые снижаются примерно вдвое.

5. Замена большого количества обычных трансформаторов на СПТ может привести к ощутимому увеличению реактивной мощности в сети, и, следовательно, к повышению напряжения в электрической сети.

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СЕТЯХ, СОДЕРЖАЩИХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

3.1. Постановка задачи

Использование ВТСП проводов в качестве проводов для обмоток трансформатора накладывает особенности на работу трансформатора, как в нормальных режимах, так и в аварийных. Структура ВТСП провода оказывает влияние на электромагнитные переходные процессы из-за «переключающего режима» (режим перехода из СП состояния в нормальное состояние). Переключающий режим оказывает значительное влияние на режимы работы ЭЭС.

Для оценки последствий применения СПТ необходимо оценить электродинамическое и тепловое воздействия тока короткого замыкания в произвольный момент времени. Для решения поставленной задачи нужно создать математическую модель СПТ, позволяющую рассчитывать электромагнитный переходной процесс, и способную адекватно моделировать устройство, учитывая его параметры в нормальном и аварийном режимах и, описывающую динамику изменений этих параметров в ходе процесса перехода в нормальное (резистивное) состояние и возврата в СП состояние. Также имеется потребность в определении возможности ограничения токов короткого замыкания при использовании ВТСП проводов второго поколения в СПТ. Необходимо провести анализ факторов, влияющих на параметры перехода СП проводов в нормальное состояние при КЗ, и факторов, влияющих на параметры возврата после устранения КЗ.

Все термины и определения в части, связанной с КЗ, используем согласно ГОСТ 26522-85 [42].

3.2. Переход в нормальное состояние и возврат в сверхпроводящее состояние ВТСП проводов второго поколения

Высокотемпературные сверхпроводники являются неидеальными сверхпроводниками второго рода, т.е. переход из сверхпроводящего состояния в нормальное состояние происходит не сразу, а имеется промежуточное смешанное состоя-

ние, при котором магнитное поле еще не полностью проникает в тело сверхпроводника. Смешанное состояние существует в пределах от первого критического тока $I_{к1}$ до второго критического тока $I_{к2}$. В этом состоянии ток протекает как по сверхпроводящему слою, так и по несверхпроводящим слоям. ВТСП провод можно представить схемой замещения приведенной на рисунке 3.1.

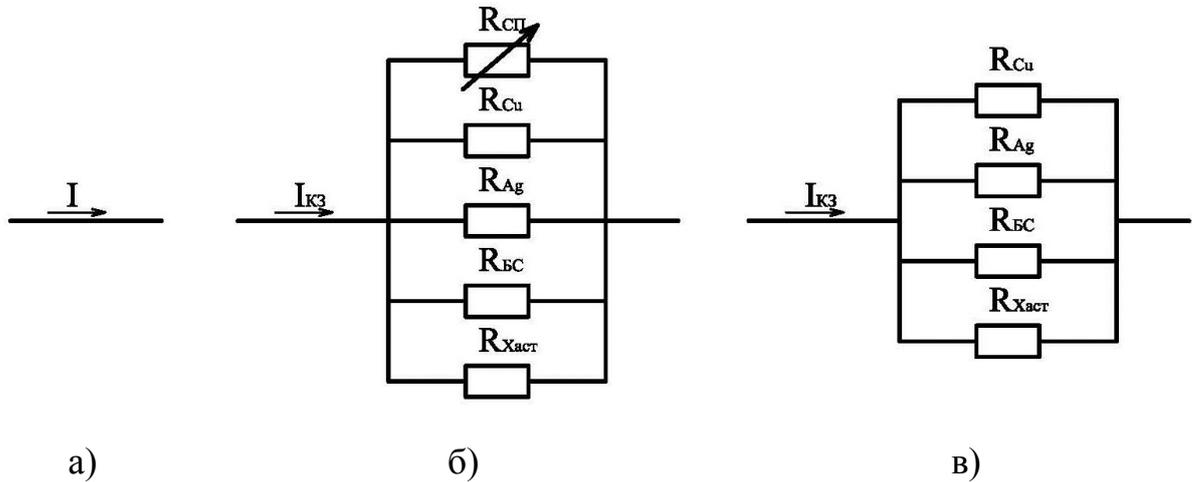


Рисунок 3.1 – Схема замещения ВТСП провода для СП состояния (а), для смешанного состояния (б) и для нормального состояния (в)

Во всех трех режимах активное сопротивление ВТСП провода определяется эквивалентным сопротивлением СП слоя и несверхпроводящих слоев

$$R_3(I, T) = \frac{R_{нс}(T) \cdot R_{сп}(T)}{R_{нс}(T) + R_{сп}(T)}, \quad (3.1)$$

где $R_{нс}$ - сопротивление несверхпроводящих слоев;

$R_{сп}$ - сопротивление СП слоя;

I - ток, протекающий по проводнику;

T - температура провода.

Величина сопротивления СП слоя может быть найдена из ВАХ ВТСП материала

$$R_{сп}(I, T) = \frac{10^{-6}}{I} \left(\frac{I}{I_k(T)} \right)^N, \quad (3.2)$$

где N - показатель степени вольт-амперной характеристики ВТСП провода, определяющий качество сверхпроводника;

$I_k(T)$ - критический ток ВТСП провода при температуре T (при температурах свыше 90 К $I_k(T)$ равно нулю.);

I_{k0} - критический ток в собственном поле при 77 К.

$$I_k(T) = -\frac{I_{k0}}{0,1848} \ln\left(\frac{T}{77}\right). \quad (3.3)$$

На рисунке 3.2 ВАХ представлена для постоянного тока.

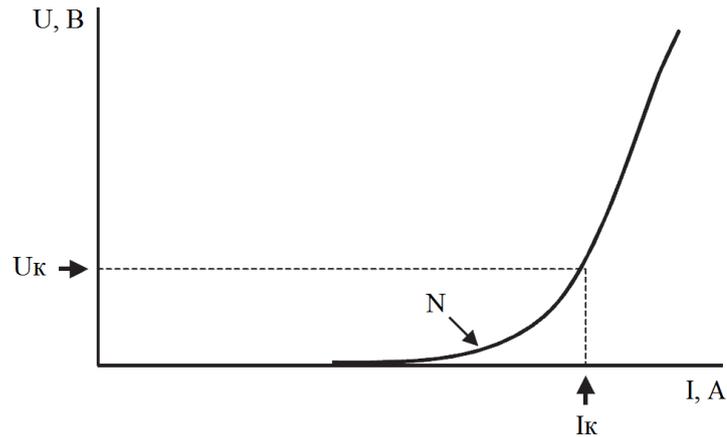


Рисунок 3.2 – Вольт-амперная характеристика ВТСП

Считается, что ВТСП перешел в нормальное состояние, если на проводе длиной 1 см появляется напряжение величиной 1 мкВ.

Тогда активное сопротивление несверхпроводящих слоев определяется как

$$R_{нс} = \frac{1}{1/R_{бс}(T) + 1/R_{Ag}(T) + 1/R_M(T) + 1/R_{хаст}(T)}, \quad (3.4)$$

где $R_{бс}$ - сопротивление буферных слоев;

R_{Ag} - сопротивление слоя серебра;

R_M - сопротивление медного слоя;

$R_{хаст}$ - сопротивление хастеллоя.

На рисунке 3.3 показаны температурные зависимости активных сопротивлений выше представленных металлов.

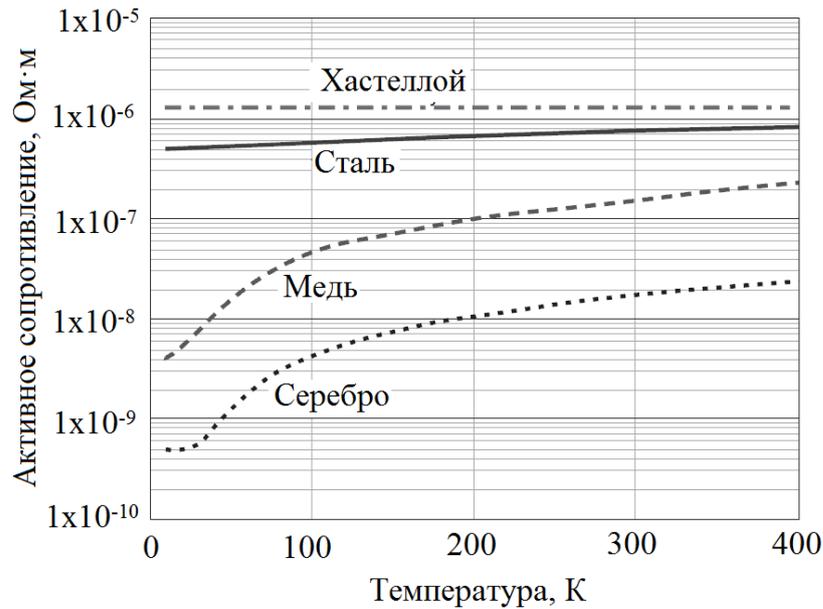


Рисунок 3.3 – Зависимость сопротивлений металлов от температуры

Важнейшим параметром является время возврата после устранения короткого замыкания. Для определения условия возврата в сверхпроводящее состояние во время бестоковой паузы или под нагрузкой необходимо определить количество тепла, выделившееся во время КЗ

$$Q(I, T) = \int_0^t I^2 R(T) dt. \quad (3.5)$$

Увеличение температуры провода вследствие тепловыделения определяется выражением [43]

$$C \frac{dT(I, T)}{dt} = Q(I, T) - Aq(T) \quad (3.6)$$

где C - полная теплоемкость провода;

A - площадь поверхности охлаждения;

q - плотность теплового потока, отводимого в жидкий азот с поверхности обмотки.

$$C = V_{\text{ВТСП}} c_{\text{ВТСП}}(T) + V_{\text{хаст}} c_{\text{хаст}}(T) + V_{\text{бс}} c_{\text{бс}}(T) + V_{\text{Ag}} c_{\text{Ag}}(T) + V_{\text{м}} c_{\text{м}}(T), \quad (3.7)$$

где $V_{\text{ВТСП}}$ и $c_{\text{ВТСП}}$ - объем и удельная объемная теплоемкость ВТСП;

$V_{\text{хаст}}$ и $c_{\text{хаст}}$ - объем и удельная объемная теплоемкость хастеллоя;

$V_{\text{бс}}$ и $c_{\text{бс}}$ - объем и удельная объемная теплоемкость буферного слоя;

V_{Ag} и c_{Ag} - объем и удельная объемная теплоемкость серебра;

V_M и c_M - объем и удельная объемная теплоемкость меди.

На рисунке 3.4. приведена зависимость удельной теплоемкости от температуры для различных металлов.

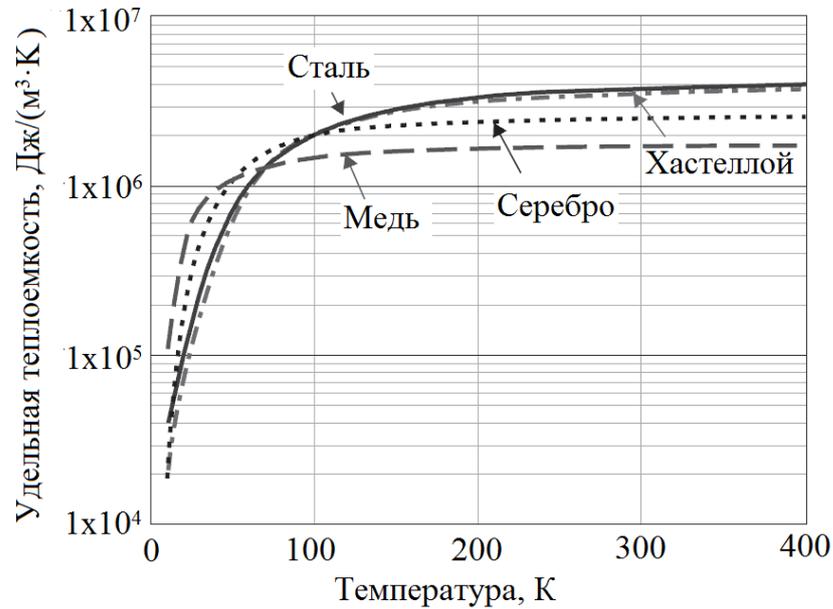


Рисунок 3.4 – Зависимость удельной теплоемкости металлов от температуры

На рисунке 3.5 приведена зависимость плотности теплового потока жидкого азота от разницы температуры между охлаждаемой поверхностью (провод) и жидким азотом.

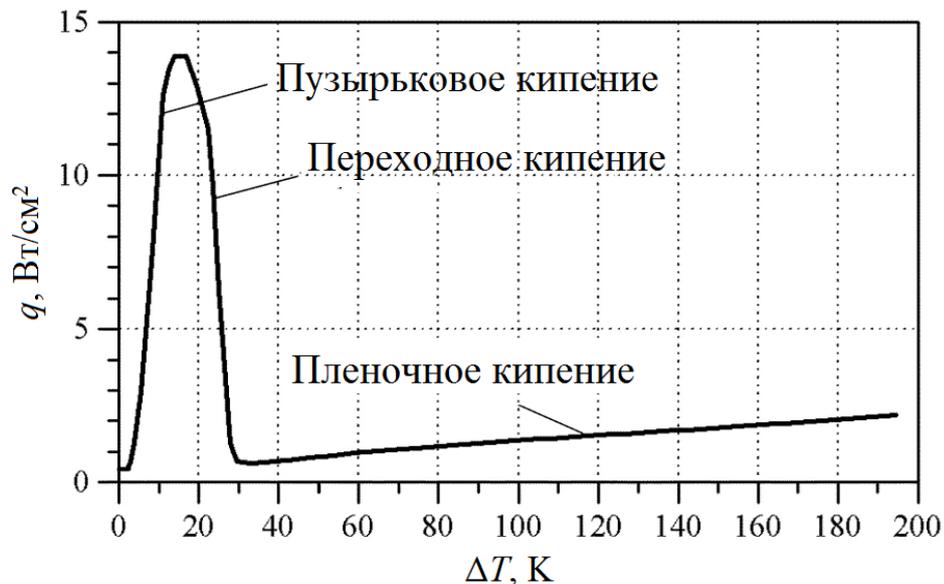


Рисунок 3.5 – Плотность теплового потока в зависимости от разницы температуры между охлаждаемой поверхностью и охлаждающей жидкостью [44]

Из рисунка 3.5 видно, что наиболее эффективное охлаждение имеет место в диапазоне разницы температур от 4 К до 30 К в режимах пузырькового и переходного кипений.

Уравнения (3.1), (3.2) и уравнение, описывающее изменение тока, должны решаться совместно. В итоге получаем нестационарное уравнение теплопроводности, которое описывает изменение температуры токоограничивающей части обмотки в зависимости от тока, протекающего по цепи, и времени

$$T(t) = T_0 + \Delta T(t) = T_0 + \frac{Q(I, T) - Aq(T)}{C(T)}, \quad (3.8)$$

где T_0 - начальная температура (77К).

На основе вышеизложенного в программно-вычислительном комплексе (ПВК) *MATLAB* реализована программа (см. приложение А) для расчета процессов перехода в нормальное состояние и возврата в СП состояние ВТСП провода второго поколения. Упрощенная блок-схема программы приведена на рисунке 3.6.

В программе рассчитывается величина активного сопротивления, падение напряжения на ВТСП проводе и т.д. Предполагается, что вначале по проводу протекает рабочий ток, в момент времени 0,1 с происходит КЗ длительностью 0,1 с. Расчеты были проведены для ВТСП проводов производства фирмы SuperPower SCS12050 и SF12050.

Таблица 3.1 – Параметры ВТСП проводов второго поколения

Тип провода	Ширина/толщина ленты, мм	I_k , А	Толщина слоя Ag, мм	Толщина подложки, мм	Толщина стабилизатора, мм	$R_{нс}$ при 77 К, Ом/м
SF12050	12/0,1	250	0,002	0,05	0,009~	0,0736
SCS12050	12/0,1	300	0,002	0,05	0,04	0,0061

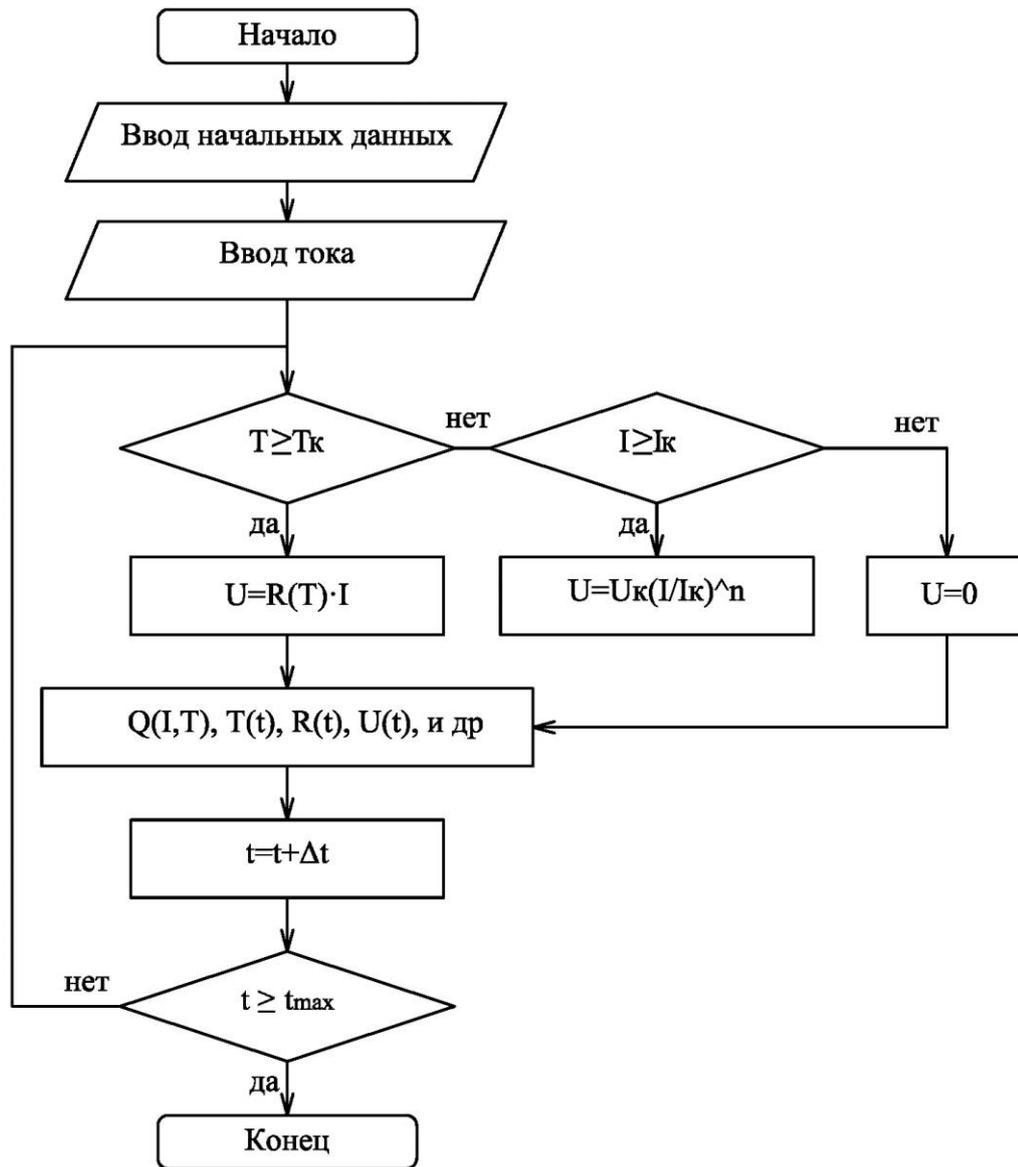


Рисунок 3.6 – Блок-схема программы для расчета процессов перехода в нормальное состояние и возврата в СП состояние ВТСП ленты второго поколения

На рисунках 3.7 и 3.8 показаны температура и сопротивление проводов при возникновении КЗ и после его устранения. Момент времени 0,1 с соответствует началу КЗ, 0,2 с – его устранению. На рисунке 3.8 показано активное сопротивление провода с длиной равной длине провода, используемого во вторичной обмотке трансформатора мощностью 40 МВА.

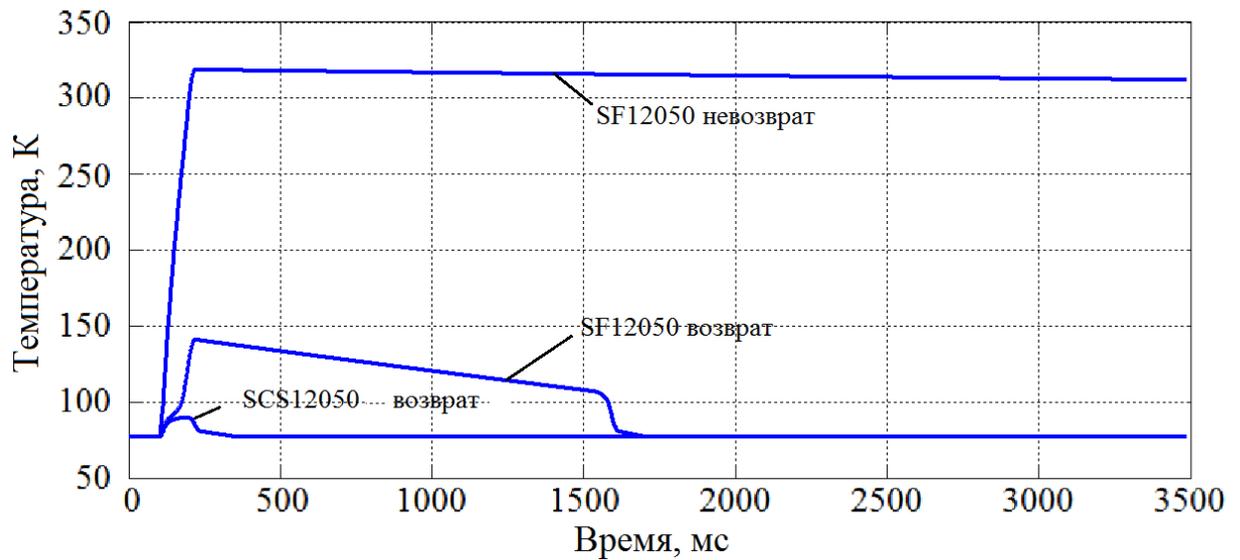


Рисунок 3.7 – Температура ВТСП проводов при разных условиях

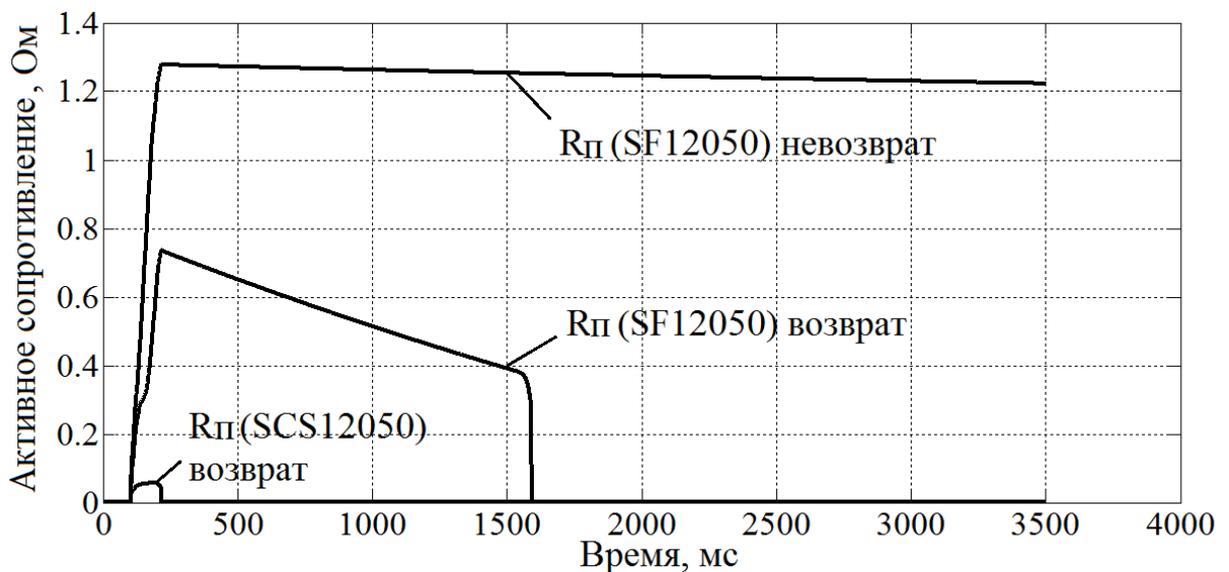


Рисунок 3.8 – Активное сопротивление провода во время и после устранения КЗ

В начальный момент перехода из СП состояния в нормальное состояние ударный ток КЗ ограничивается сопротивлением несверхпроводящих слоев, соответствующих температуре 77 К. В дальнейшем в течение КЗ провод разогревается, соответственно температуре увеличивается активное сопротивление.

После устранения КЗ обмотка начинает охлаждаться. Однако, из-за большой разницы температур между обмоткой и жидким азотом плотность теплового потока, соответствующая пленочному кипению (см. рисунок 3.5), невелика и охлаждение провода занимает некоторое время. На рисунке 3.8 резкое снижение сопротивления в момент времени 1,6 с соответствует переходу от пленочного ки-

пения к переходному кипению и далее к пузырьковому кипению. В режиме пузырькового кипения отвод тепла от нагретой обмотки максимален, и СП слоя провода быстро охлаждается до критической температуры. Для быстрого возврата трансформатора в СП состояние возможно потребуется принудительная циркуляция жидкого азота, способствующая срыву пузырьковой пленки в режиме пленочного кипения.

В качестве сравнения результатов полученных в ПКВ *MATLAB* на рисунке 3.9 показаны результаты экспериментов, приведенных в [45].

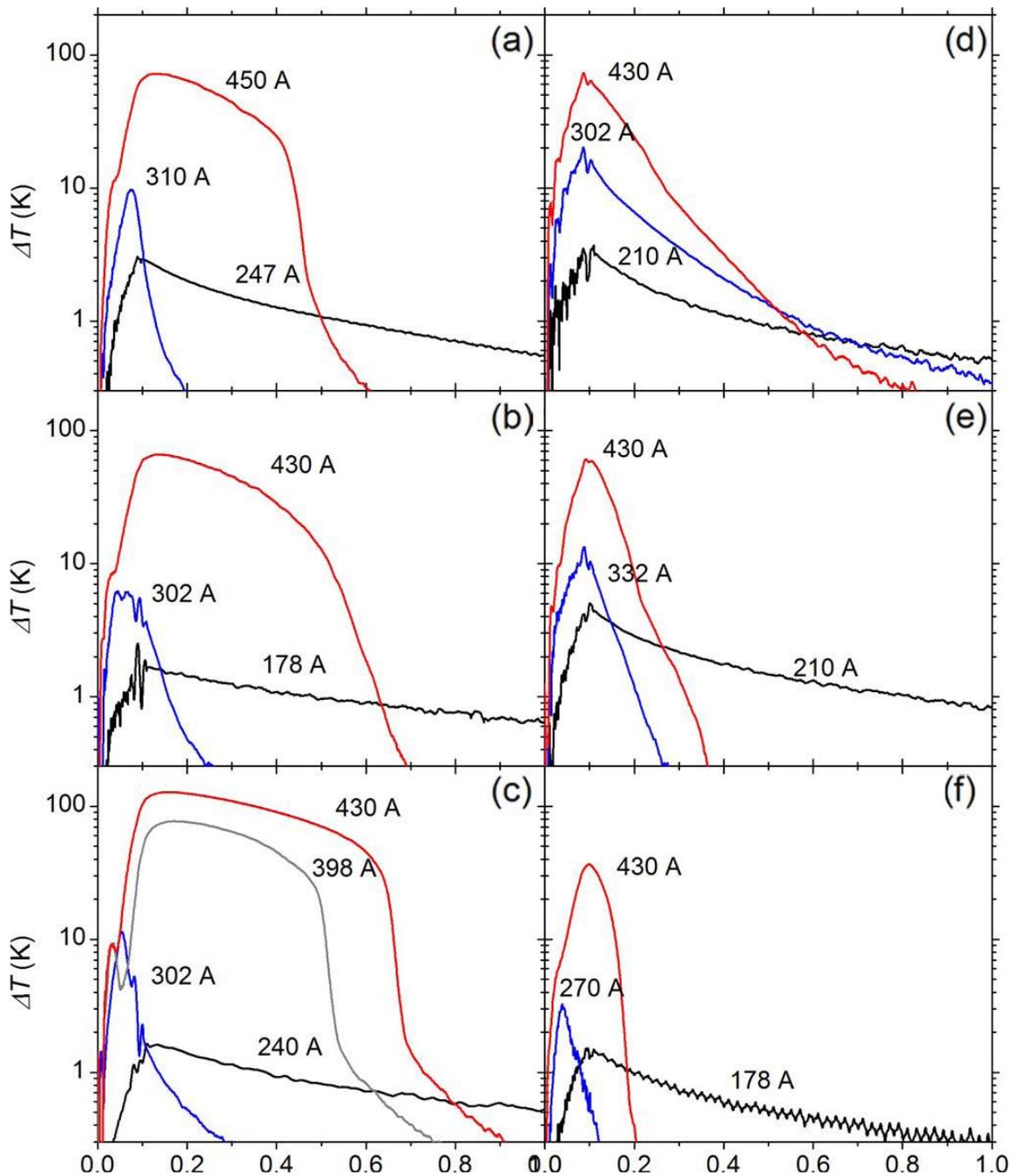


Рисунок 3.9 – Рост температуры при КЗ в разных условиях [45]

На рисунке 3.9 (a) – ВТСП лента SCS4050 без изоляции, (b) – та же лента, подвергнутая лазерной абляции, для увеличения шероховатости образца, (c) – отполированная лента, (d) – лента, изолированная каптоном (полиимидная пленка) толщиной 25 мкм с винтовой намоткой, (e) – лента, изолированная каптоном (полиимидная пленка) толщиной 25 мкм с продольной намоткой, (f) – лента, покрытая лаком толщиной 75 мкм.

Примечательно, что время охлаждения лент, изолированных каптоном и лаком, меньше, чем в других случаях. Объясняется это тем, что их поверхность имеет меньшую шероховатость, т.е. большую площадь поверхности охлаждения.

В ПК *MATLAB* также рассчитывались параметры перехода провода в предположении, что рассчитываемый провод используется в СПТ мощностью 40 МВА. Предполагалось, что КЗ происходит на отходящем присоединении и устраняется через 0,1 с без отключения трансформатора. При расчетах было определено, что возврат провода в сверхпроводящее состояние после устранения КЗ зависит от соотношений величин тока КЗ и нагрузочного тока после устранения КЗ. То есть соотношение рабочего тока и тока КЗ с учетом ограничения должно быть таким, чтобы тепло выделившееся во время КЗ не превысило некоторого критического значения, свыше которого для возврата в СП состояние необходимо отключать трансформатор (рисунок 3.10).

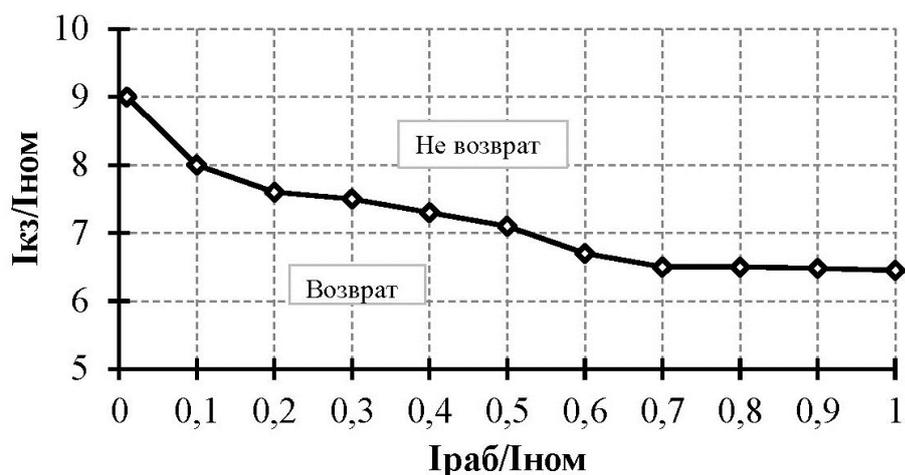


Рисунок 3.10 – Критерий возврата обмотки в СП состояние после устранения КЗ

3.3. Математическая модель электромагнитных переходных процессов в цепях содержащих сверхпроводниковые трансформаторы

Как было показано в п. 2.1 параметры схемы замещения СПТ имеют отличные значения от параметров схемы замещения обычного трансформатора, что сказывается на электромагнитных переходных процессах. Вместе с тем, при возникновении КЗ, т.е. при превышении тока критического значения, сверхпроводник переходит из СП состояния в нормальное.

Уравнение цепи, представленной на рисунке 3.11, при возникновении КЗ описывается дифференциальным уравнением

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = (L_c + L_T) \frac{di(t)}{dt} + i(t)(R_c + R_T(T)), \quad (3.9)$$

где R_c и L_c - активное сопротивление и индуктивность системы;

R_T и L_T - активное сопротивление и индуктивность трансформатора.

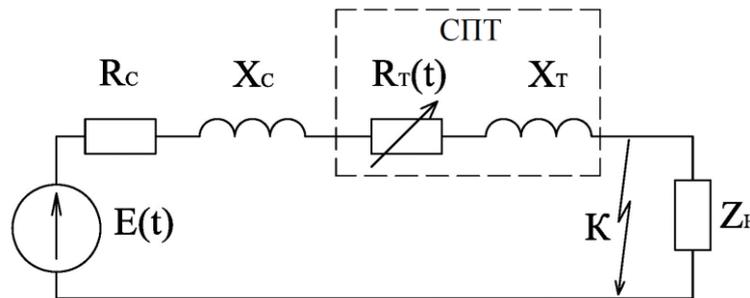


Рисунок 3.11 – Схема замещения к расчету переходного процесса
Решение уравнения (3.9) имеет следующий вид [46]

$$i(t) = \frac{U_m}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + \left[\frac{U_m}{Z_H} \sin(\alpha - \varphi_H) - \frac{U_m}{Z_k} \sin(\alpha - \varphi_k) \right] e^{-\frac{t \cdot \omega \cdot (R_c + R_T(T))}{X_k}}, \quad (3.10)$$

здесь Z_k - полное сопротивление короткозамкнутого участка.

Из всего вышеизложенного вытекает общая математическая модель ограничения тока КЗ с помощью трансформатора с ВТСП обмотками, основанная на решении нестационарного уравнения теплопроводности (3.8) и дифференциального уравнения изменения тока короткого замыкания (3.9).

$$\left\{ \begin{array}{ll} R_T = 0 & I < I_{\kappa} - \text{СП состояние сопротивление равно нулю;} \\ R_T = \frac{R_{\text{нс}}(T) \cdot R_{\text{сп}}(T)}{R_{\text{нс}}(T) + R_{\text{сп}}(T)} & I_{\kappa} < I < I_{\text{мо}} - \text{переход в нормальное состояние;} \\ R_T = R_{\text{нс}}(T) & I > I_{\text{мо}} - \text{токоограничивающее действие;} \\ R_T = f(T) & I = 0 - \text{возврат в СП состояние после отключения КЗ.} \end{array} \right. \quad (3.11)$$

В целях упрощения представления активного сопротивления во время КЗ следует задавать его некоторой элементарной функцией, например, экспоненциальной

$$R_T = R_{\text{т.кз}} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \quad (3.12)$$

где $R_{\text{т.кз}}$ - активное сопротивление трансформатора на момент устранения КЗ;

τ_1 - постоянная времени.

Значение τ_1 в основном зависит от величины тока КЗ, поперечного сечения провода и находится в диапазоне 0,05 – 0,1с..

В целях упрощения активное сопротивление во время процесса возврата также можно задавать экспоненциальной функцией

$$R_T = R_{\text{т.кз}} e^{-\frac{t}{\tau_2}}, \quad (3.13)$$

где $R_{\text{т.кз}}$ - активное сопротивление на момент отключения короткого замыкания;

τ_2 - постоянная времени.

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.

В уравнении (3.9) при подстановке (3.12) и (3.13) получается нелинейное дифференциальное уравнение, решение которого невозможно выразить с помощью элементарных функций, как, например, в [47]. В этой связи данное уравнение целесообразно интегрировать численно, используя программно-вычислительные комплексы.

Необходимо подчеркнуть, что во время возврата при достижении проводом (обмоткой) критической температуры происходит скачкообразное уменьшение

сопротивления. Задать активное сопротивление в этот момент времени целесообразно линейной функцией.

На рисунке 3.12 приведены кривые токов КЗ в случае использования обычного медного провода и для случая использования ВТСП провода. Расчет токов производился в программном комплексе АТР ЕМТР.

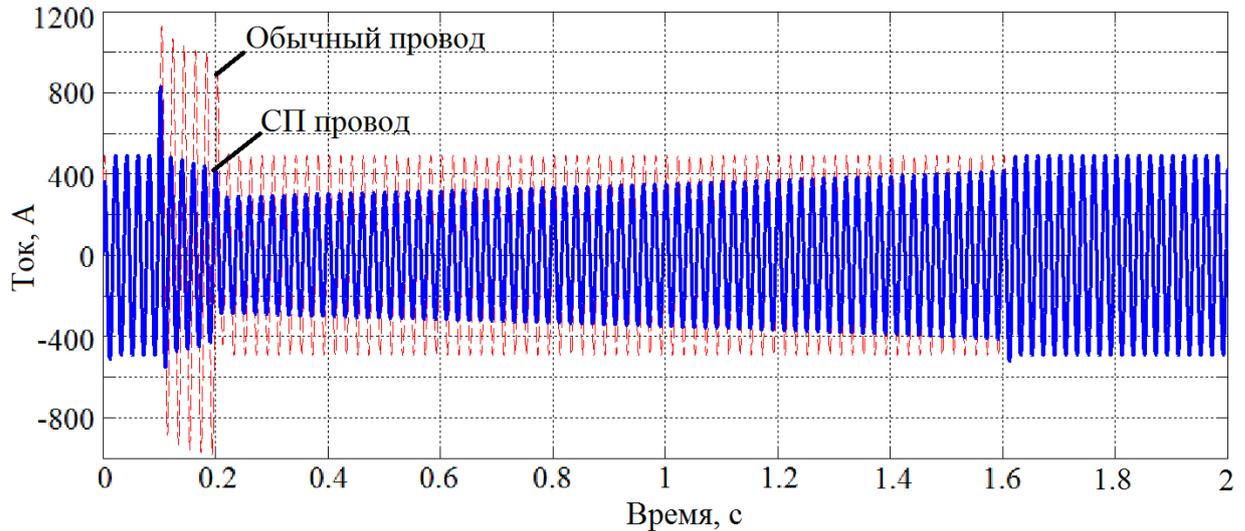


Рисунок 3.12 – Кривые токов КЗ для обычного и ВТСП проводов

Таким образом, ток КЗ ограничивается при использовании СП проводов. Используя значения токов КЗ с ограничением и без ограничения введем понятие коэффициента ограничения тока короткого замыкания

$$k_{огр} = \frac{i_{огр}}{i_{без.огр}}. \quad (3.14)$$

В начальный момент КЗ, как было сказано выше, ударный ток КЗ ограничивается эквивалентным активным сопротивлением обмотки, соответствующем начальной температуре (77К), затем сопротивление вследствие возрастания температуры возрастает. Как следствие аperiодическая составляющая тока КЗ в случае со сверхпроводящим проводом затухает быстрее по сравнению со случаем обычного провода, кроме этого, периодическая составляющая тока КЗ ограничивается возрастающим сопротивлением. Однако, после устранения КЗ оставшееся сопротивление ограничивает ток нагрузки. На рисунке 3.12 время возврата длится с момента 0,2 с до 1,6 с. В момент возврата обмотки (провода) в СП состояние происходит всплеск тока, связанный с изменением параметров сети – скачкооб-

разным устранением активного сопротивления. Величина всплеска зависит как от параметров сети, так и от времени (момента) возврата.

Для сравнения приводятся осциллограммы, полученные экспериментально в [17] и [48].

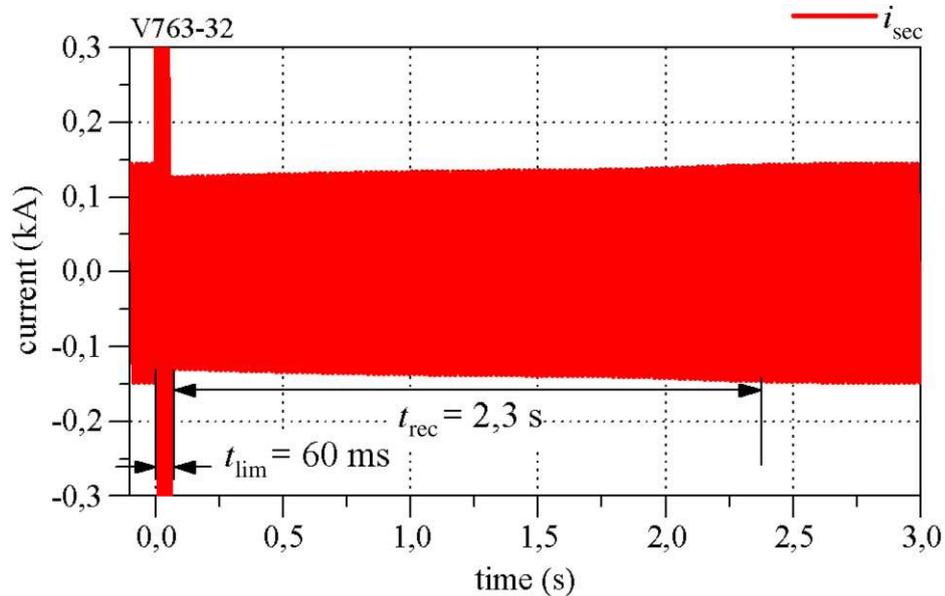


Рисунок 3.13 – Временная зависимость тока при возврате под нагрузкой [17]

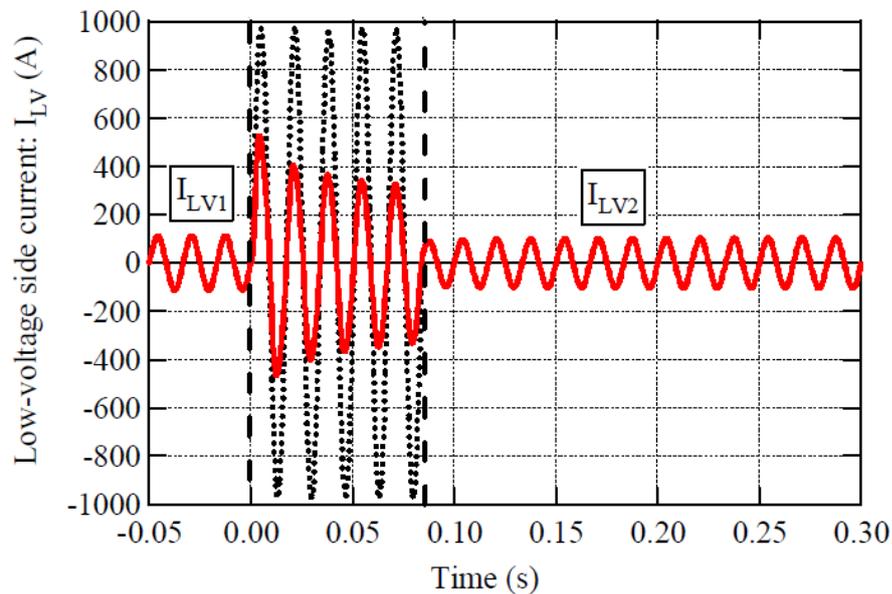


Рисунок 3.14 – Кривые токов при токоограничении и в процессе возврата [48]

Из рисунков 3.13 и 3.14 видно, что предложенная математическая модель хорошо совпадает с результатами экспериментов, проведенных в [17] и [48].

3.4. Определение возможности ограничения токов короткого замыкания

Действительный ток короткого замыкания трансформатора в эксплуатации превосходит ток КЗ, определенный по параметрам опыта КЗ, примерно на 37% из-за насыщения магнитопровода трансформатора [49]. В условиях снижения реактивного сопротивления активное сопротивление СПТ в аварийном режиме должно обеспечивать необходимый уровень ограничения тока КЗ. Для определения параметров СПТ, проявляющихся при КЗ необходимо спроектировать основные размеры активной части трансформатора. В качестве примера производится приближенный расчет СПТ мощностью 40 МВА с соотношением напряжений 115/11 кВ. Используется ВТСП провод второго поколения производства фирмы Super-Power SCS12050 с критическим током $I_k = 300$ А в собственном поле и при 77 К. С учетом того, что I_k снижается при использовании на переменном токе рабочий критический ток $I_{к.раб} = 300 \cdot 0,5 = 150$ А.

Фазный ток стороны ВН

$$I_{ВНном} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 201 \text{ А.}$$

Фазный ток стороны НН

$$I_{ННном} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{40000}{\frac{\sqrt{3} \cdot 11}{\sqrt{3}}} = 1212 \text{ А.}$$

Зададимся индукцией в стержне равной $B_c = 1,6$ Т. Диаметр стержня для трансформатора мощностью 40 МВА равен $d = 0,6$ м. Коэффициент заполнения площади круга с $d = 0,6$ площадью ступенчатой формы $k_{кр} = 0,92$. Тогда активное сечение стержня

$$P_c = \frac{k_{кр} \cdot \pi d^2}{4} = \frac{0,92 \cdot \pi \cdot 0,6^2}{4} = 0,259 \text{ м}^2.$$

Напряжение витка

$$U_e = 4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot P_c = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot 0,259 = 92 \text{ В.}$$

Число витков обмотки НН

$$W_{HH} = \frac{U_{\Phi_{HH}}}{U_{\varepsilon}} = \frac{11000}{92} = 119,56 \approx 120.$$

Число витков обмотки ВН

$$W_{BH} = \frac{U_{\Phi_{BH}}}{U_{\varepsilon}} = \frac{115000 / \sqrt{3}}{92} = 721,68 \approx 722.$$

Рабочая плотность тока в ВТСП проводе $j = 125$ А/мм². Тогда ориентировочное сечение витка обмотки ВН

$$P_{BH} = \frac{I_{\Phi_{BH}}}{j} = \frac{201}{125} = 1,6 \text{ мм}^2.$$

Ориентировочное сечение витка обмотки НН

$$P_{HH} = \frac{I_{\Phi_{HH}}}{j} = \frac{1212}{125} = 9,7 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, в обмотке ВН наматывается 2 провода в параллели, в обмотке НН 10 проводов в параллели.

Высота одного витка обмотки ВН с учетом изоляции составляет $h_{B_{BH}} = 14$ мм. Округлим число витков в обмотке ВН до 720 и предположим, что число слоев $n_{C_{L_{BH}}} = 10$. Тогда в одном слое $W_{C_{L_{BH}}} = 72$ витка и высота обмотки составляет

$$h_{BH} = W_{C_{L_{BH}}} \cdot h_{B_{BH}} = 72 \cdot 14 = 1008 \text{ мм}.$$

Обмотка НН на $W_{C_{L_{HH}}} = 2$ по 60 витков. Высота витка обмотки $h_{B_{HH}} = 14$ мм, тогда высота обмотки НН

$$h_{HH} = W_{C_{L_{HH}}} \cdot h_{B_{HH}} = 60 \cdot 14 = 840 \text{ мм}.$$

Толщина обмотки ВН

$$b_{BH} = t_{\text{витка.вн}} \cdot n_{C_{L_{BH}}} = 2 \cdot 10 = 20 \text{ мм},$$

где $t_{\text{витка.вн}} = n_{\text{паралл.вн}} \cdot t_{\text{пров}} = 2 \cdot 1 = 2$ - толщина витка.

Толщина обмотки НН

$$b_{HH} = t_{\text{витка.нн}} \cdot n_{C_{L_{HH}}} = 10 \cdot 2 = 20 \text{ мм},$$

где $t_{\text{витка.нн}} = n_{\text{паралл.нн}} \cdot t_{\text{пров}} = 10 \cdot 1 = 10$ - толщина витка.

Предположим, что толщина криостата составляет 60 мм. Средняя длина витка обмотки НН

$$L_{ср.нн} = 2\pi(R_c + t_{крио} + b_{нн} / 2) = 2\pi(0,3 + 0,06 + 0,01) = 2,323 \text{ м,}$$

где R_c - радиус стержня; $t_{крио}$ - толщина криостата.

Средняя длина витка обмотки ВН

$$\begin{aligned} L_{ср.вн} &= 2\pi(R_c + t_{крио} + t_{об.нн} + \delta + b_{вн} / 2) = \\ &= 2\pi(0,3 + 0,06 + 0,004 + 0,03 + 0,01) = 2,537 \text{ м,} \end{aligned}$$

где $\delta = 0,03$ - главный изоляционный промежуток.

Длина всех витков обмотки ВН

$$L_{об.вн} = L_{ср.вн} W_{ВН} = 2,537 \cdot 720 = 1826,64 \text{ м.}$$

Длина всех витков обмотки НН

$$L_{об.нн} = L_{ср.нн} W_{НН} = 2,323 \cdot 120 = 278,76 \text{ м.}$$

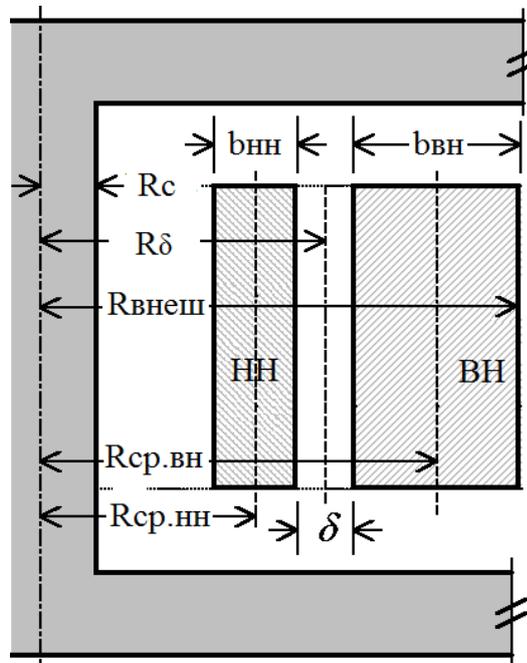


Рисунок 3.15 – К расчету индуктивного сопротивления

Эквивалентное активное сопротивление несверхпроводящих слоев при температуре 77 К $R_{нс} = 0,0065$ Ом/м, тогда активное сопротивление несверхпроводящих слоев обмотки ВН

$$R_{ВН} = L_{об.вн} R_{нс} / n_{паралл.вн} = 1826,64 \cdot 0,0065 / 2 = 5,93 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление обмотки НН

$$R_{НН} = L_{об.нн} R_{нс} / n_{паралл.нн} = 278,76 \cdot 0,0065 / 10 = 0,181 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление трансформатора в начальный момент КЗ

$$R_T = R_{BH} + R'_{HH} = 5,93 + 0,181 \left(\frac{115}{\sqrt{3} \cdot 11} \right)^2 = 12,52 \text{ Ом.}$$

Активная составляющая напряжения КЗ в начальный момент КЗ

$$u_a = \frac{I_{ном} (R_{BH} + R'_{HH}) 100}{U_\phi} = \frac{201 \cdot 12,52 \cdot 100}{115000 / \sqrt{3}} = 3,7\%.$$

Реактивная составляющая напряжения КЗ

$$u_p = \frac{100 \cdot S_{ном}}{U_{ном}^2} \frac{(2\pi)^2 \mu_0 f W^2}{h + 0,32(R_{внеш} - R_c)} \left(\frac{b_{HH}}{3} \left(R_{cp.HH} + \frac{b_{HH}}{4} \right) + \frac{b_{BH}}{3} \left(R_{cp.BH} - \frac{b_{BH}}{4} \right) + \delta R_\delta \right) =$$

$$= \frac{100 \cdot 40}{115^2} \frac{(2\pi)^2 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 720^2}{1,008 + 0,32(0,414 - 0,3)} \times$$

$$\times \left(\frac{0,02}{3} \left(0,37 + \frac{0,02}{4} \right) + \frac{0,02}{3} \left(0,404 + \frac{0,02}{4} \right) + 0,03 \cdot 0,385 \right) = 6,2\%.$$

Напряжение короткого замыкания в начальный момент КЗ

$$u = \sqrt{u_a^2 + u_p^2} = \sqrt{3,7^2 + 6,2^2} = 7,2\%.$$

В таблице 3.2 приведены параметры ВТСП проводов второго поколения и параметры СПТ для каждого варианта ВТСП провода. Провода SF12050, SCS12050 SCS4050 производится фирмой SuperPower, провода 344С, 344S – фирмой American Superconductor. На данный момент эти фирмы являются лидерами в производстве ВТСП второго поколения.

Таблица 3.2 – Параметры СПТ при различных параметрах СП провода [50,51]

Тип провода	SF12050	SCS12050	SCS4050	344С	344S
Ширина/толщина, мм	12/0,1	12/0,1	4/0,1	4,4/0,2	4,3/0,3
Критический ток, А	250	300	90	75	80
Толщина слоя Ag, мм	0,002 мм	0,002	0,002	0,001	0,001
Толщина подложки, мм	0,05 мм	0,05	0,05	0,075	0,075
Толщина стабилизатора, мм	0,009	0,04	0,04	0,12(Cu)	0,22(Fe)
$R_{нс}$, Ом/м	0,0736	0,00605	0,0181	0,0057	0,266
Число витков ВН/НН	760/126	720/120	760/126	760/126	760/126
Длина кабеля в обмотке ВН/НН, м	1876,7/ 287,3	1790,64/ 272,7	1883,8/ 287,7	1948,3/ 291,3	1988,9/ 294,5

Продолжение таблицы 3.2

Тип провода	SF12050	SCS12050	SCS4050	344C	344S
Число жил в кабеле ВН/НН	4/24	2/10	12/68	14/80	12/76
R обмотки ВН/НН	34/0,89	5,81/0,177	2,84/0,07	0,8/0,02	44/1,03
$u_{кз}$ в СП состоянии, %	4,32	6,2	5,35	6,12	6,96
$u_{кз}$ в норм. состоянии, %	20,78	7,2	5,61	6,13	25,7
Z_T в норм. состоянии, Ом	68,7	15,3	18,5	20,3	85
Ток КЗ, А	966,1	4334	3574	3270	780

На величину токоограничивающего сопротивления в большей степени оказывает толщина медного слоя, которая непосредственно оказывает влияние на время возврата СПТ после ограничение тока КЗ.

В целом, процесс расчета СПТ можно представить блок-схемой, представленной на рисунке 3.16.

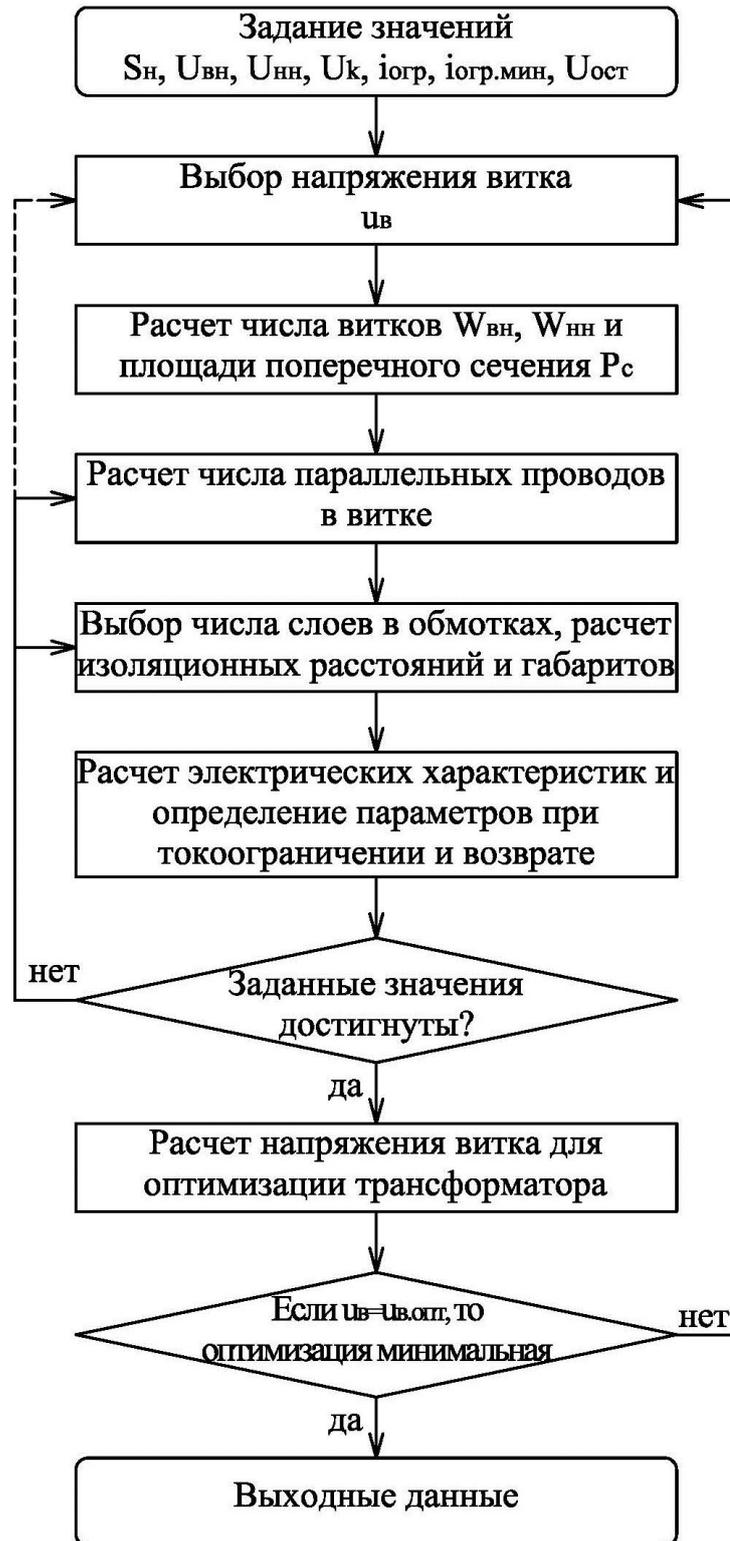


Рисунок 3.16 – Блок-схема расчета СПТ

Величину требуемого активного сопротивления предлагается подбирать путем частичного задействования обмотки в ограничении тока КЗ. Этого можно достичь использованием разных проводов с различными параметрами, при которых токоограничивающая часть обладает достаточным сопротивлением для ограниче-

ния тока КЗ, а нетокоограничивающая часть обладает незначительным сопротивлением.

При известном $R_3(I, T)$ может быть найдена необходимая длина кабеля в ограничивающей части обмотки.

$$l_{\text{пр}} = \frac{R_{\text{треб}} n_{\text{в}} n_{\text{ш}}}{R_3(I, T)},$$

где $R_{\text{треб}}$ - требуемое сопротивление для ограничения тока КЗ;

$n_{\text{в}}$ и $n_{\text{ш}}$ - число слоев в обмотке по высоте и ширине соответственно.

Число витков, задействованных в ограничении тока КЗ

$$w = \frac{l_{\text{пр}}}{2\pi r_{\text{в}}},$$

где $r_{\text{в}}$ - средний радиус витка.

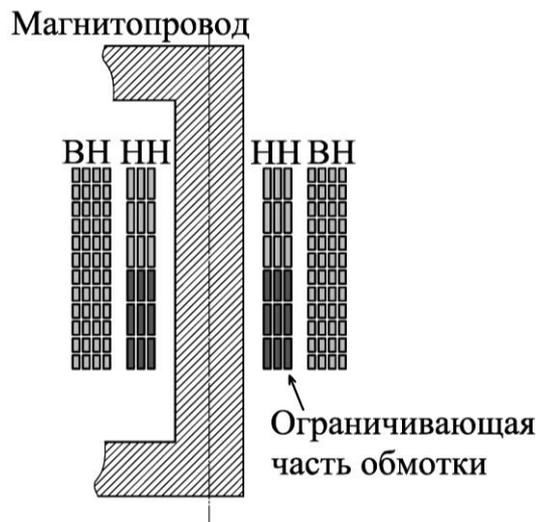


Рисунок 3.17 – Схематичный вид токоограничивающей части обмотки СПТ

Такое исполнение позволяет добиться не только требуемого значения активного сопротивления, но также появляется возможность добиться быстрого возврата трансформатора в сверхпроводящее состояние во время бестоковой паузы или после отключения КЗ на отходящем присоединении за счет использования дополнительных средств охлаждения в токоограничивающей части обмотки.

Обмотки трансформатора во время КЗ испытывают значительные механические усилия. В СПТ обмотки имеют меньшее поперечное сечение, следовательно, обмотки СПТ должны быть сконструированы таким образом, чтобы выдержи-

вать эти усилия. Например, использование транспонированных ВТСП проводов позволяет снизить не только потери в ВТСП проводе, но и увеличить механическую прочность обмотки [52].

3.5. Сравнительный анализ случаев использования СПТ и обычного трансформатора с расщепленной обмоткой

Проведем сравнение случаев установки на подстанции СПТ и обычного трансформатора с точки зрения ограничения токов короткого замыкания. На рисунках 3.18 и 3.19 показаны схемы в случае установок СПТ и обычного трансформатора со следующими параметрами:

Система: $U_C = 115$ кВ, $R_C = 1$ Ом, $X_C = 10$ Ом;

СПТ: $S_{ном} = 40$ МВА, $U_{BH} = 115$ кВ, $U_{HH} = 11$ кВ, $u_k = 5$ %.

Обычный трансформатор: $S_{ном} = 40$ МВА, $U_{BH} = 115$ кВ, $U_{HH} = 11$ кВ, $u_{кВ-Н} = 10,5$ %, $u_{кН-Н} = 38$ %, $\Delta P_{КЗ} = 170$ кВт.

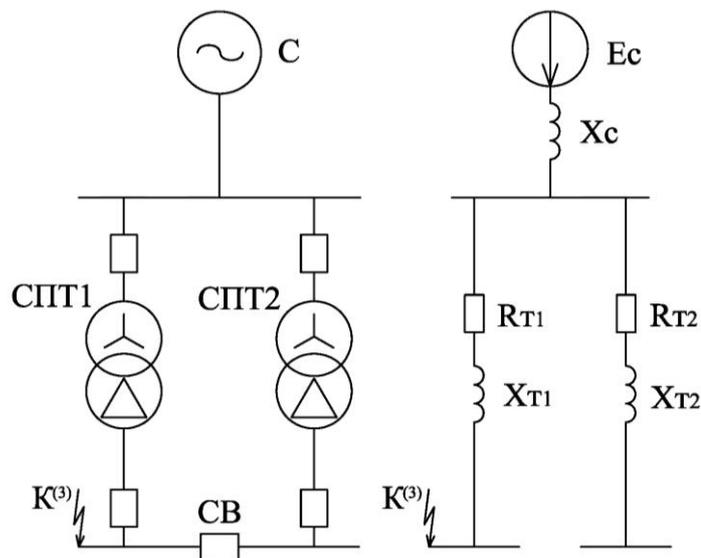


Рисунок 3.18 – Принципиальная схема и схема замещения для расчета токов КЗ в случае установки СПТ

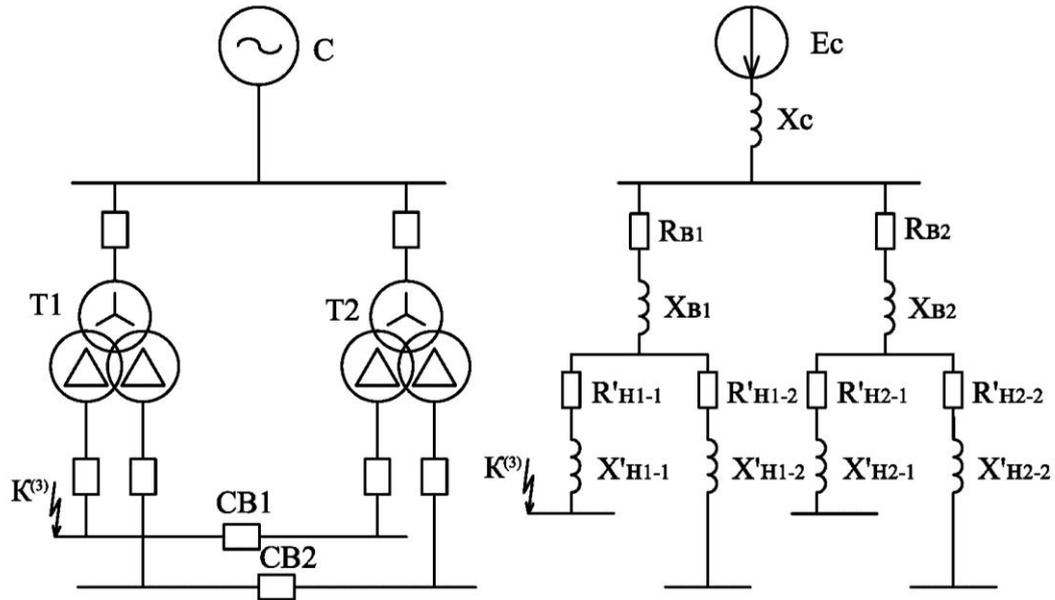


Рисунок 3.19 – Принципиальная схема и схема замещения для расчета токов КЗ в случае установки обычного трансформатора с расщепленной обмоткой
Индуктивное сопротивление СПТ

$$X_{СПТ} = \frac{u_{\kappa} U_{НОМ}^2}{100 S_{НОМ}} = \frac{5 \cdot 115^2}{100 \cdot 40} = 16,53.$$

Активные сопротивления трансформатора с расщепленной обмоткой

$$R_B = \frac{\Delta P_{\kappa} U_{НОМ}^2}{2 \cdot 10^3 S_{НОМ}^2} = \frac{170 \cdot 115^2}{2 \cdot 10^3 \cdot 40^2} = 0,7 \text{ Ом.}$$

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

Индуктивные сопротивления трансформатора с расщепленной обмоткой

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

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

$$Z_{H-H} = \frac{u_{\kappa H-H} U_{НОМ}^2}{100 S_{НОМ}} = \frac{38 \cdot 115^2}{100 \cdot 40} = 125,63,$$

$$Z_{H1} = Z_{H2} = \frac{Z_{H-H}}{2} = \frac{125,637}{2} = 62,82,$$

$$Z_B = Z_{B-H} - \frac{Z_{H-H}}{4} = 34,715 - \frac{125,637}{4} = 3,30,$$

$$X_B = \sqrt{Z_B^2 - R_B^2} = \sqrt{3,3^2 - 0,7^2} = 3,22,$$

$$X_H = \sqrt{Z_H^2 - R_H^2} = \sqrt{62,8^2 - 1,4^2} = 62,8.$$

Ток КЗ в случае использования СПТ, в предположении, что в момент КЗ является активное сопротивление величиной 20 Ом

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

$$= \frac{115}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(1 + 20)^2 + (10 + 16,53)^2}} = 1,962 \text{ кА.}$$

Ток КЗ в случае использования трансформатора с расщепленной обмоткой

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

$$= \frac{115}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(1 + 0,7 + 1,4)^2 + (10 + 3,22 + 62,8)^2}} = 0,872 \text{ кА.}$$

Таким образом, ток КЗ на стороне НН ограничивается в большей степени при расщеплении обмотки. И, следовательно, в СПТ имеет смысл также расщеплять обмотку НН для ограничения токов КЗ на стороне НН. В совокупности расщепление обмотки и функция ограничения токов КЗ СПТ дадут значительный эффект в ограничении тока КЗ.

3.6. Бросок тока намагничивания в сверхпроводниковом трансформаторе

Бросок тока намагничивания в трансформаторе возникает при включении трансформатора под напряжение из-за насыщения магнитопровода трансформатора, связанного с нелинейной характеристикой намагничивания стали магнитопровода (рисунок 3.20).

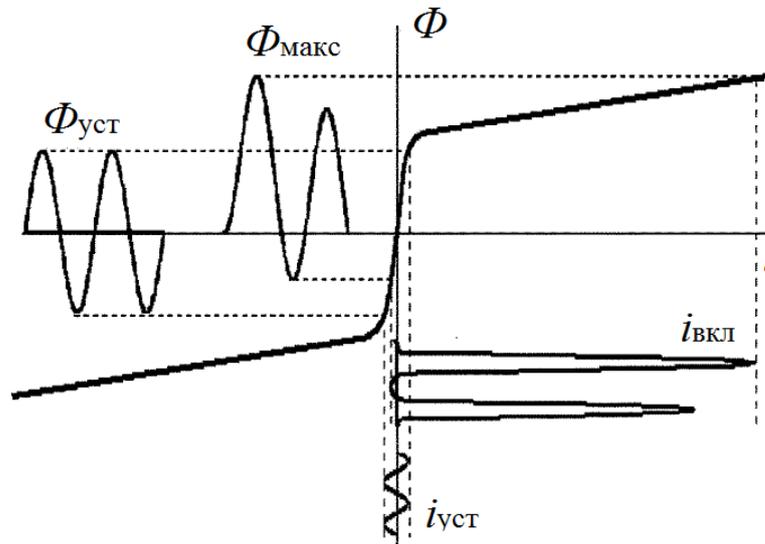


Рисунок 3.20 – Построение кривой тока включения

Бросок тока при включении может достигать 10-ти кратных значений номинального тока. Как следствие такие токи вызывают переход СП обмоток в нормальное состояние. Оценим численно значения бросков тока намагничивания для СПТ и обычного трансформатора по выражению, приведенному в [53]

$$I_M = \frac{U_{НОМ} \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{\left(2 - \frac{B_0 - B_C(0)}{B_{НОМ}} \right)}{X_{ПИТ} + X_S}$$

где $U_{НОМ}$ - номинальное напряжение питающей сети;

B_0 - индукция насыщения стали ($B_0 = 2$ Тл);

$B_C(0)$ - остаточная индукция в стержне трансформатора ($B_C(0) = 1,67$ Тл);

$B_{НОМ}$ - номинальная индукция в стержне трансформатора;

$X_{ПИТ}$ - индуктивное сопротивление питающей сети;

X_S - индуктивное сопротивление обмотки без учета стали.

$$X_S = \omega \frac{\mu_0 W^2 \pi \left(D_{ВНУТР} + \frac{2}{3} a \right)^2}{4 H_S},$$

где W - число витков обмотки;

$D_{ВНУТР}$ - внутренний диаметр обмотки;

a - радиальный размер обмотки (толщина);

H_s - высота окна магнитопровода.

Сравнение бросков тока проведем для трансформаторов мощностью 40 МВА без приведения подробного расчета, приведя лишь интересующие значения искомых величин. Индуктивное сопротивление СПТ без учета стали

$$X_{S.СПТ} = 314 \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 720^2 \pi \left(0,788 + \frac{2}{3}0,02\right)^2}{4 \cdot 1,128} = 91,45.$$

Индуктивное сопротивление обычного трансформатора без учета стали

$$X_s = 314 \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 720^2 \pi \left(0,73 + \frac{2}{3}0,1\right)^2}{4 \cdot 1,128} = 92,695.$$

Бросок тока намагничивания в случае использования СПТ при остаточной индукции равной 1,67 Тл

$$I_{M.СПТ} = \frac{115\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{\left(2 - \frac{2-1,67}{1,5}\right)}{10 + 91,45} = 1,647 \text{ кА.}$$

Бросок тока намагничивания в случае использования обычного трансформатора

$$I_M = \frac{115\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{\left(2 - \frac{2-1,67}{1,5}\right)}{10 + 92,695} = 1,628 \text{ кА.}$$

Как видно, уровень броска тока включения остается на том же уровне, что и в случае обычного трансформатора. Однако в случае с СПТ наблюдается небольшое увеличение тока намагничивания вследствие уменьшения индуктивности обмотки. С одной стороны, обмотка НН имеет больший внутренний диаметр из-за криостата, и это могло бы увеличить и внутренний диаметр обмотки ВН, тем самым снижая бросок тока, но с другой стороны, общий объем обмоток снижается, уменьшая при этом площадь катушки (обмотки). И данное обстоятельство увеличивает величину броска тока намагничивания.

В работах [54-56] приводятся исследования, связанные с переходом СП обмоток трансформатора в нормальное состояние, вызванного броском тока при

включении. В данных работах показывается, что при превышении тока включения критического тока обмотки, последняя переходит в нормальное состояние, проводится сравнение с трансформатором с медными обмотками.

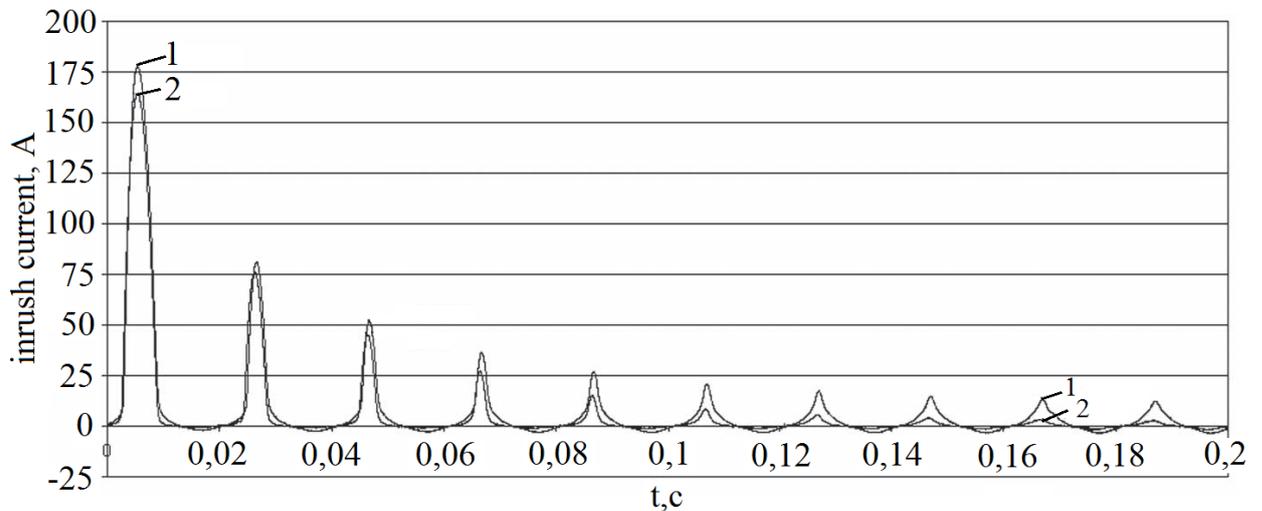


Рисунок 3.21 – Ток включения трансформаторов: 1 – СПТ; 2 – трансформатор с медными обмотками [56]

При сравнении оказывается, что ток включения в СПТ затухает медленнее по причине возврата обмотки в СП состояние. После возврата обмотки время затухания тока включения в большей степени определяется параметрами сети, к которой подключен трансформатор.

Во избежание перехода в нормальное состояние необходимо использование системы с контролем момента включения, т.е. с улавливанием момента, когда напряжение максимально. Такая система включения позволяет снизить ток включения до 1-2% номинального тока.

Другим способом исключения недостатка, связанного с включением СПТ, является способ включения, когда трансформатор предварительно возбуждается в режиме холостого хода и находится в режиме ожидания до момента затухания тока включения и возврата обмотки в СП состояние. После затухания тока включения и возврата обмотки в СП состояние к трансформатору подключается нагрузка. Включение нагрузки сразу, на предварительно не возбужденный трансформатор, приводит к длительному нормальному состоянию СП обмоток и представляет собой опасность с точки зрения выделения большого количества тепла в криостате трансформатора.

3.7. Выводы

1. Сверхпроводниковый трансформатор оказывает существенное влияние на электромагнитные переходные процессы, причем огромное влияние на них оказывают условия охлаждения. В первом полупериоде ток КЗ ограничивается в меньшей степени по сравнению с последующими полупериодами. В последующих периодах ток КЗ ограничивается в большей степени из-за быстрого затухания апериодической составляющей и роста температуры СП провода, приводящего к росту сопротивления, что в свою очередь ограничивает периодическую составляющую тока КЗ.

2. Показано, что величина активного сопротивления, появляющегося во время КЗ, определяется толщиной стабилизатора.

3. Показано, что возврат трансформатора в сверхпроводящее состояние после ограничения зависит от величины тока КЗ, от тока нагрузки после устранения КЗ и от параметров СП провода, в частности от толщины слоя стабилизатора.

4. Предложена математическая модель электромагнитных переходных процессов, которая позволяет моделировать инерционность изменения активного сопротивления устройства, оценить тепловое и электродинамическое воздействие тока КЗ.

5. Использование функции ограничения в СП трансформаторах позволит повысить надежность электроснабжения, улучшить технико-экономические показатели по сравнению со случаем использования отдельного сверхпроводящего ограничителя тока.

6. Броски тока намагничивания при включении СПТ превышают броски тока намагничивания при включении обычного трансформатора, и могут привести к переходу обмоток в нормальное состояние, следовательно, необходимы меры по их снижению.

4. ВЛИЯНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

4.1. Постановка задачи

Электромеханические переходные процессы, возникающие при больших возмущениях, имеют длительность порядка 1-1000 с. Время перехода в нормальное состояние и последующий возврат СПТ в СП состояние входит в данный диапазон времени, поэтому необходимо оценить влияние СПТ на электромеханические переходные процессы.

Сверхпроводниковый трансформатор, как было показано выше, имеет меньшее значение индуктивного сопротивления рассеяния по сравнению с обычным трансформатором. При этом во время короткого замыкания СПТ может обладать значительным активным сопротивлением. В этой связи необходимо провести анализ влияния СПТ на статическую и динамическую устойчивость ЭЭС, в которой установлен СПТ, с различными параметрами перехода в нормальное состояние и возврата в СП состояние. Необходимо рассмотреть тепловое воздействие тока КЗ в зоне токоограничения с помощью СПТ.

При анализе оказываемого влияния используются различные программно-вычислительные комплексы.

4.2. Влияние сверхпроводниковых трансформаторов на статическую устойчивость

Для оценки влияния СПТ на статическую устойчивость в качестве примера рассмотрим простейшую схему электропередачи, в которой генератор работает через трансформатор и линию электропередачи на шины приемной системы бесконечной мощности (ШБМ). Схема электропередачи приведена на рисунке 4.1.

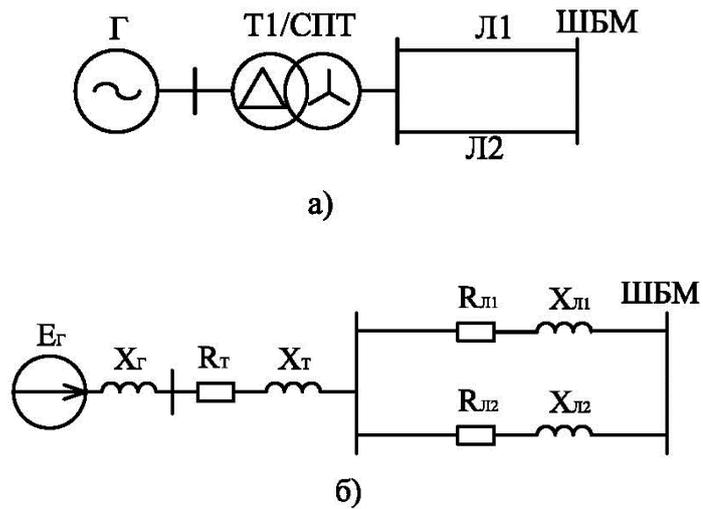


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема (а) и схема замещения (б) простейшей электропередачи генератор-ШБМ

Угловая характеристика мощности $P(\delta)$ имеет вид, приведенный на рисунке 4.2.

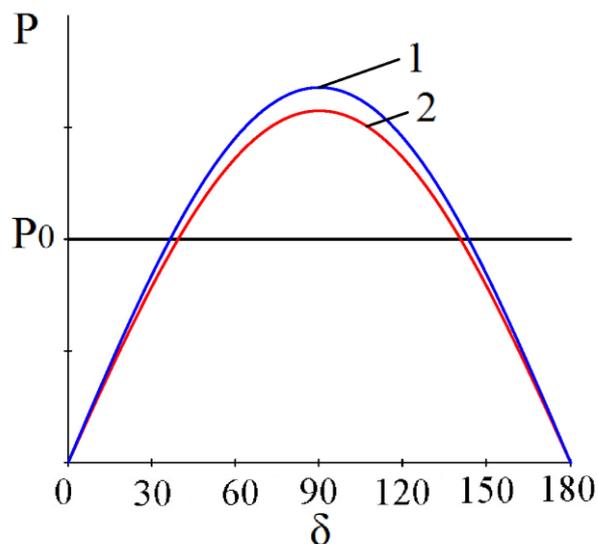


Рисунок 4.2 – Характеристики мощности: 1 – в случае с СПТ; 2 – в случае с традиционным трансформатором

Из рисунка 4.2. очевидно, что синхронизирующая мощность в случае с СПТ имеет большее значение, чем в случае с обычным трансформатором

$$\frac{dP^{\text{СПТ}}(\delta)}{d\delta} > \frac{dP(\delta)}{d\delta}. \quad (4.1)$$

Т.е. данное обстоятельство может рассматриваться как критерий улучшения статической устойчивости ЭЭС.

Величина индуктивного сопротивления СПТ зависит от принятых конструктивных решений (размеры обмоток, параметры ВТСП провода и т.д.) и как следствие предел передаваемой мощности может варьироваться в зависимости от степени снижения сопротивления трансформатора. Определим соотношение максимумов характеристик мощности для случаев использования СПТ и традиционного трансформатора (при равенстве ЭДС систем)

$$\frac{P_{\max}^{\text{СПТ}}}{P_{\max}} = \frac{E_{\Gamma}^{\text{СПТ}} U_C \cdot X_{\Sigma}}{X_{\Sigma}^{\text{СПТ}} \cdot E_{\Gamma} U_C}, \quad (4.2)$$

и построим зависимость этого соотношения от степени снижения сопротивления трансформатора (рисунок 4.3) для рассматриваемого примера.



Рисунок 4.3 – Зависимость отношения максимумов мощностей от степени снижения сопротивления трансформатора

Из рисунка 4.3 видно, что при замене обычного трансформатора на трансформатор с СП обмотками последний оказывает заметное влияние на предел передаваемой мощности. Оценим численно увеличение предела передаваемой мощности с параметрами сети, приведенными в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры сети [57, 58]

Генератор	$S_{\text{НОМ}} = 235 \text{ МВА}, X'_d = 0,295 \text{ о.е.}, X_d = 1,7 \text{ Т}_j = 7,4 \text{ с}$
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	$L = 150 \text{ км}, r_{\text{уд}} = 0,121 \text{ Ом/км}, x_{\text{уд}} = 0,435 \text{ Ом/км}$

При принятом сопротивлении СПТ ($u_k = 3\%$) коэффициент запаса увеличивается с 57 % в случае традиционного трансформатора до 60 % в случае СПТ. Нужно отметить, что в рассматриваемой простейшей схеме, в которой генератор работает на шины приемной системы бесконечной мощности, влияние СПТ на характеристику мощности уменьшено из-за большого сопротивления генератора. В схеме же, например, с двумя системами соизмеримой мощности увеличение предела передаваемой мощности более выражено. Рассмотрим две электростанции, соизмеримые по мощности и работающие на общую нагрузку. Схема сети приведена на рисунке 4.4 [59], и ее параметры в таблице 4.2.

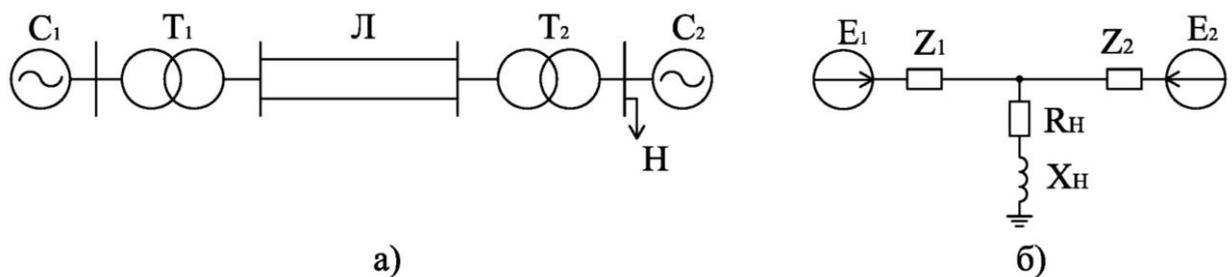


Рисунок 4.4 – Принципиальная схема (а) и схема замещения (б) системы с двумя электростанциями

Таблица 4.2 – Параметры сети

Система	$E_1 = 115 \text{ кВ}, X_{C1} = 15 \text{ Ом}, E_2 = 115 \text{ кВ}, X_{C2} = 20 \text{ Ом}$
Обычный тр-р	$U_{BH} = 242 \text{ кВ}, S_{ном} = 250 \text{ МВА}, u_k = 11\%$
СПТ	$U_{BH} = 242 \text{ кВ}, S_{ном} = 250 \text{ МВА}, u_k = 3\%$
Линия	$x_{y\partial} = 0,43 \text{ Ом/км}, r_{y\partial} = 0,12 \text{ Ом/км}, l = 100 \text{ км}$

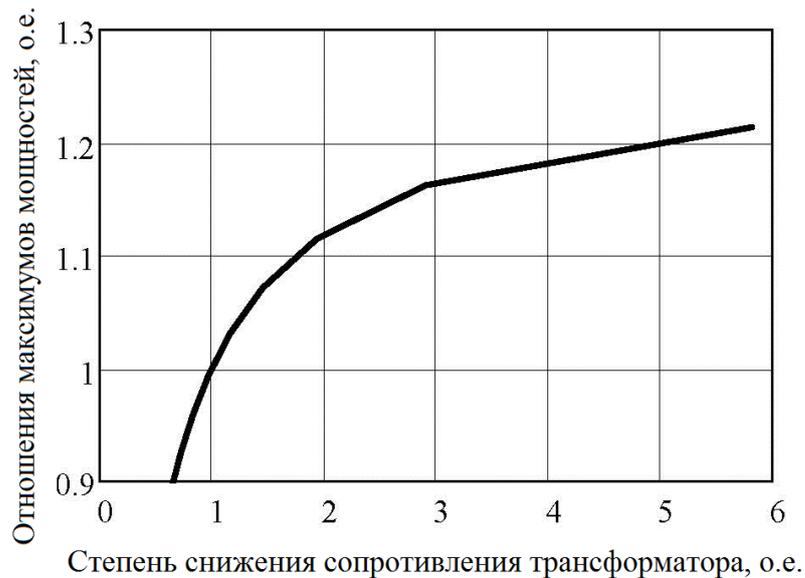


Рисунок 4.5 – Зависимость отношения максимумов мощностей от степени снижения сопротивления трансформатора

И в этом случае коэффициент запаса увеличивается на

$$\Delta K_3 = \frac{P_{\text{МАКС}}^{\text{СПТ}} - P_{\text{МАКС}}}{P_{\text{МАКС}}} \cdot 100 = \frac{211,9 - 179,1}{179,1} \cdot 100 = 18,3\% .$$

Также нужно отметить тот факт, что СПТ обладает большой перегрузочной способностью, допустима двукратная перегрузка в течение 48 часов [60]. Таким образом, СПТ оказывает положительное влияние на предел передаваемой мощности.

4.3. Влияние сверхпроводниковых трансформаторов на динамическую устойчивость

Как было показано выше, СПТ ограничивает токи КЗ. Рассмотрим влияние СПТ с функцией ограничения токов КЗ на динамическую устойчивость. Ограничение токов КЗ с помощью СПТ носит резистивный характер, и, следовательно, имеет отличия от [61], где для токоограничения используется СОТ индуктивного типа. Сравним два случая: случай, когда в ЭЭС установлен традиционный трансформатор и случай, когда установлен СПТ с токоограничивающей функцией, причем СПТ возвращается в СП состояние после устранения короткого замыкания.

Обычно при расчете устойчивости выявляют точку, в которой КЗ наиболее опасно, и расчеты проводятся для нее. Такой подход дает несколько завышенные результаты в пользу надежности. В рассматриваемой схеме (рисунок 4.1) самой неблагоприятной точкой трехфазного КЗ является начало или конец линии, т.к. в этом случае передача мощности от генератора к системе отсутствует.

На рисунке 4.6 показаны угловые характеристики мощности в случае использования обычного трансформатора. В рабочем режиме генератор работает при некотором равновесном угле δ_0 . При возникновении трехфазного КЗ мощность генератора падает почти до нуля вследствие чего ротор генератора начинает ускоряться, увеличивается угол δ . После отключения КЗ режим работы определяется угловой характеристикой P^{III} [62].

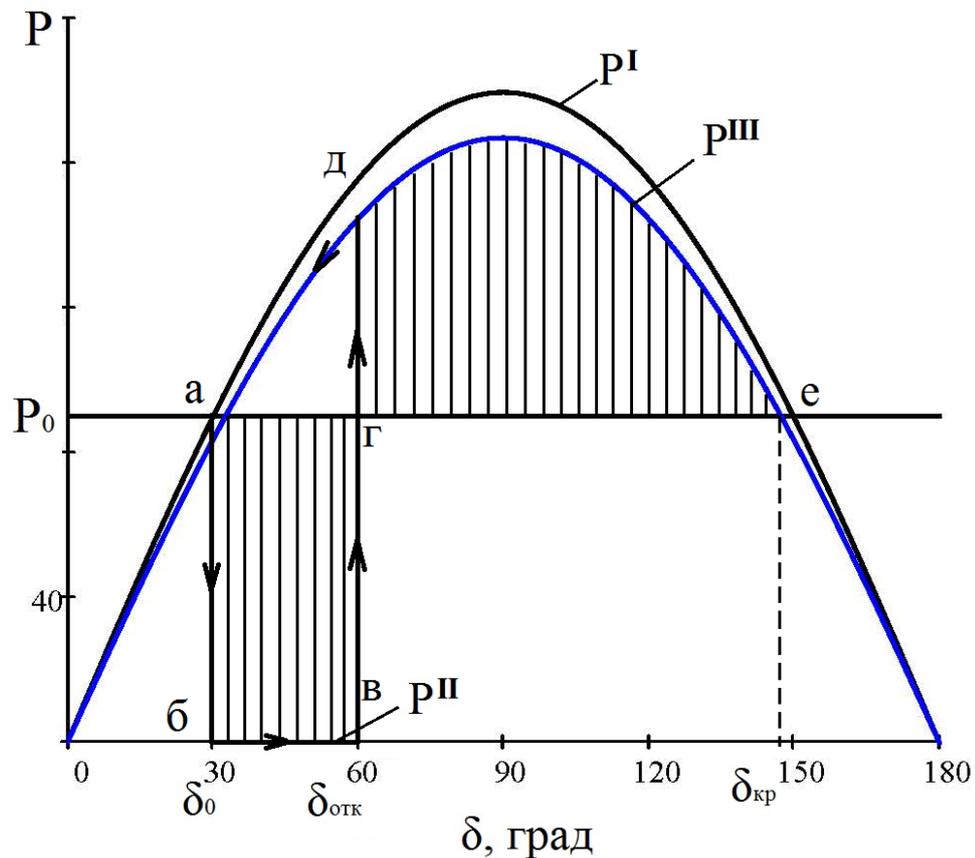


Рисунок 4.6 – Угловые характеристики мощности в случае использования обычного трансформатора: P^{I} – доаварийная; P^{II} – во время аварии; P^{III} – послеаварийная

При использовании СПТ появляющееся продольное активное сопротивление в момент КЗ ограничивает ток КЗ и компенсирует сброс мощности генерато-

ра, вследствие чего ротор генератора ускоряется в меньшей степени и, более того, при больших значениях активного сопротивления может затормозиться. Переходные процессы при появлении активного сопротивления СПТ схожи с включением нагрузочных резисторов. Однако, имеются некоторые отличия, связанные с тем, что появляющееся активное сопротивление СПТ возникает непосредственно в начальный момент короткого замыкания, а не к моменту отключения КЗ как в случае включения нагрузочных резисторов [63-65].

На рисунке 4.7 показаны угловые характеристики мощности в случае использования СПТ при малых значениях активного сопротивления, для которых амплитуда аварийной характеристики мощности гораздо меньше амплитуды рабочей характеристики. При этом площадка ускорения *абвгд* оказывается меньшей, чем в случае использования обычного трансформатора. Одновременно это обстоятельство сопровождается увеличением площадки торможения за счет того, что СПТ не успевает мгновенно вернуться в СП состояние и оставшееся активное сопротивление приподнимает характеристику мощности.

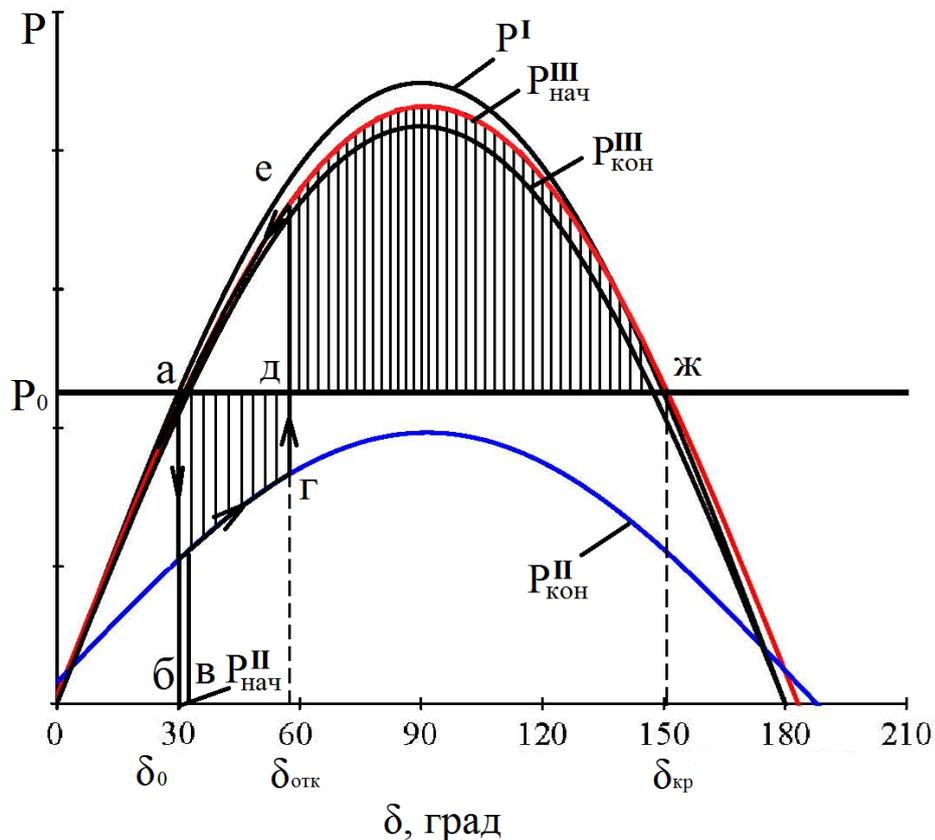


Рисунок 4.7 – Угловые характеристики мощности в случае использования СПТ при малых значениях активного сопротивления

С учетом этого, критерием улучшения динамической устойчивости может выступать факт увеличения времени предельного отключения [66]. Предельный угол отключения (угол при котором отключается КЗ) определяется из условия предельного равенства площадок ускорения и торможения [67]

$$\delta_{\text{отк.пред}} = \arccos \left[\frac{P_0(\delta_{\text{кр}} - \delta_0) + P_{\text{макс}}^{\text{III}} \cos \delta_{\text{кр}} - P_{\text{макс}}^{\text{II}} \cos \delta_0}{P_{\text{макс}}^{\text{III}} - P_{\text{макс}}^{\text{II}}} \right], \quad (4.3)$$

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

$$\sqrt{\frac{2T_j(\delta_{\text{отк.пред}}^{\text{СПТ}} - \delta_0^{\text{СПТ}})}{P_0}} > \sqrt{\frac{2T_j(\delta_{\text{отк.пред}} - \delta_0)}{P_0}}, \quad (4.4)$$

или

$$\delta_{\text{отк.пред}}^{\text{СПТ}} - \delta_{\text{отк.пред}} > \delta_0^{\text{СПТ}} - \delta_0. \quad (4.5)$$

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

$$\Delta\delta_{\text{отк.пред}} > \Delta\delta_0. \quad (4.6)$$

Однако необходимо отметить, что длительность протекания тока в СПТ ограничивается материалом стабилизатора и необходимостью возврата СПТ в сверхпроводящее состояние. Длительность протекания тока КЗ в традиционных масляных трансформаторах достигает 4 с на стороне 35 кВ и 3 с на стороне 110 кВ [68]. Длительность протекания тока КЗ в СПТ составляет не более 0,2 с без применения дополнительных мер по увеличению допустимой длительности короткого замыкания [69, 70]. К мерам по увеличению длительности протекания тока КЗ относятся намотка параллельно со сверхпроводящим проводом обычного провода, либо использование ВТСП провода с большой толщиной стабилизатора. И та и другая мера приводит к увеличению габаритов обмотки, индуктивности, поля рассеяния, что в итоге снижает эффективность сверхпроводникового трансформатора.

Когда во время КЗ появляется активное сопротивление большой величины аварийная характеристика мощности соизмерима с рабочей характеристикой (рисунок 4.8).

Исходный режим работы характеризуется точкой a , при возникновении КЗ вначале мощность генератора падает (точка b на характеристике $P_{нач}^{II}$), но с ростом активного сопротивления мощность выдаваемая генератором увеличивается (характеристика $P_{кон}^{II}$). 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 $P_{нач}^{II}$ (точки b и $в$) также исключаются из рассмотрения.

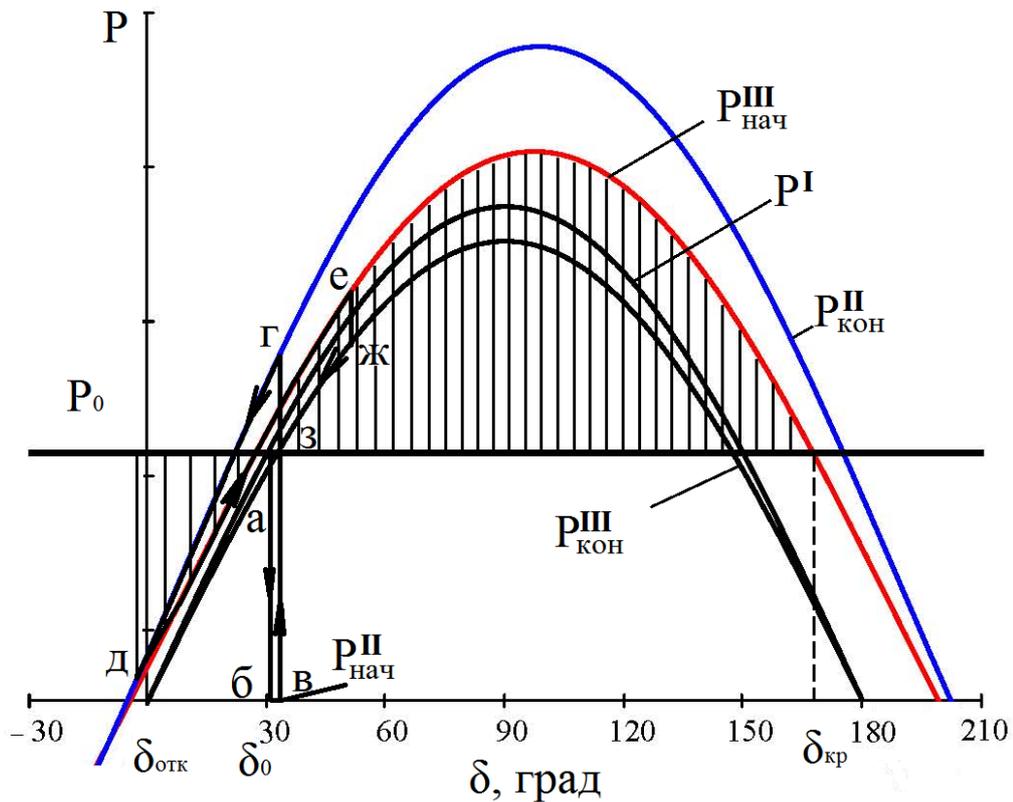


Рисунок 4.8 – Угловые характеристики мощности в случае использования СПТ при больших значениях активного сопротивления

При некотором значении активного сопротивления $R_{СПТ}$ 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.

4.4. Численный расчет параметров электромеханических переходных процессов при наличии в сети сверхпроводникового трансформатора

Более подробно рассмотрим влияние на электромеханические переходные процессы на примере сети, приведенной на рисунке 4.1, с параметрами, приведенными в таблице 4.1 В начале одной из параллельной линии происходит трехфазное КЗ после чего она отключается, после устранения КЗ, происходит автоматическое повторное включение линии через 0,4 с. Принято допущение, что генератор функционируют без системы автоматического регулирования возбуждения. Расчет производится для случая, когда в ЭЭС установлен традиционный трансформатор, и для случаев СПТ с разными активными сопротивлениями. Появляющееся активное сопротивление трансформатора во время короткого замыкания (за счет потери СП) задавалось как

$$R_T = R_{T.KЗ} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}),$$

путем последовательных включений параллельно-последовательных соединений активных сопротивлений.

Во время возврата предполагалось, что активное сопротивление также изменялось по экспоненциальному закону

$$R_T = R_{T.KЗ} e^{-\frac{t}{\tau_2}},$$

путем последовательных отключений параллельно-последовательных соединений активных сопротивлений.

Характер изменения активного сопротивления показан на рисунке 4.9.

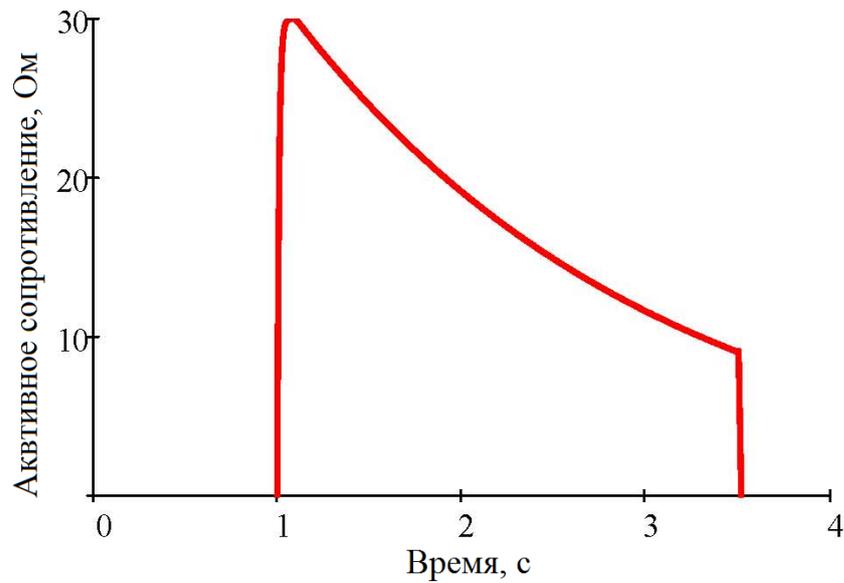


Рисунок 4.9 – Изменение активного сопротивления СПТ во времени

На рисунке 4.10 приведены результаты расчетов относительного угла δ в программном комплексе ПВК *Mustang* для $\tau_1 = 1$ мс.

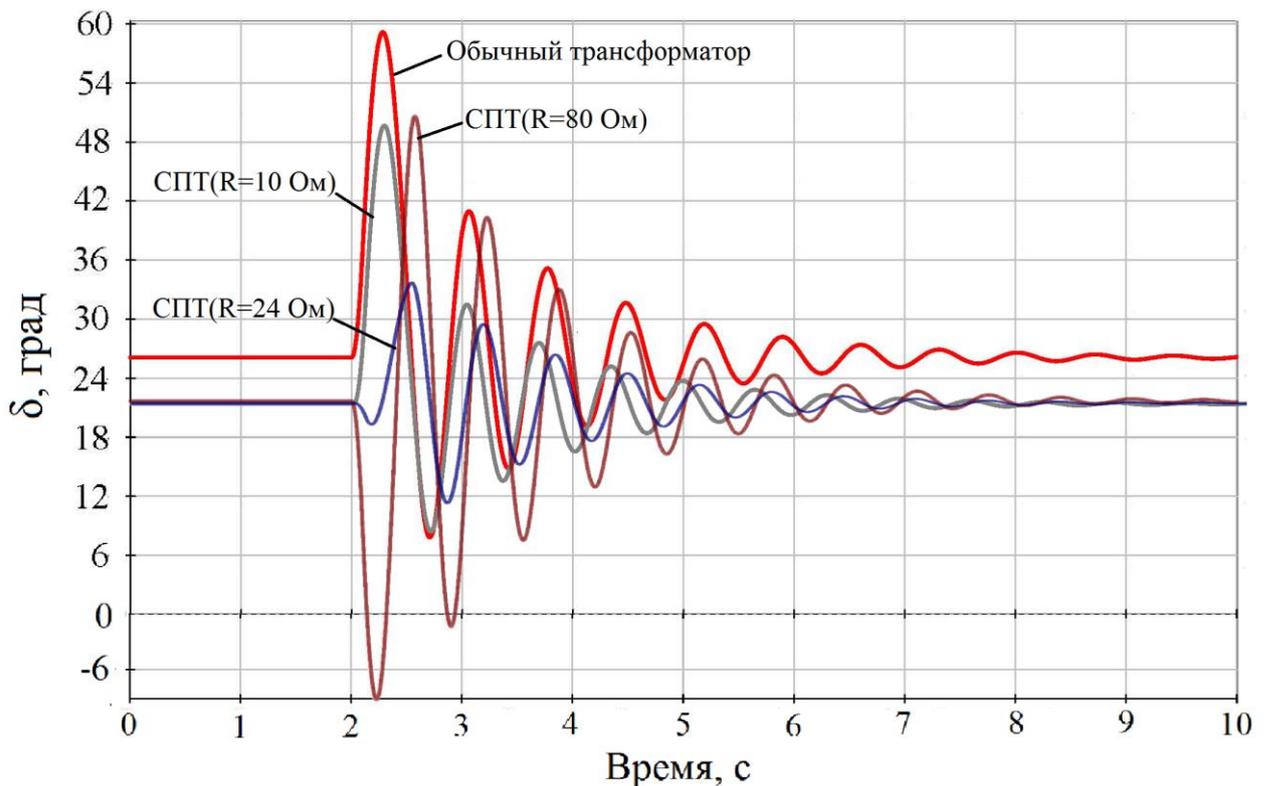


Рисунок 4.10 – Относительный угол ротора генератора для разных случаев

В случае использования 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 4.11.

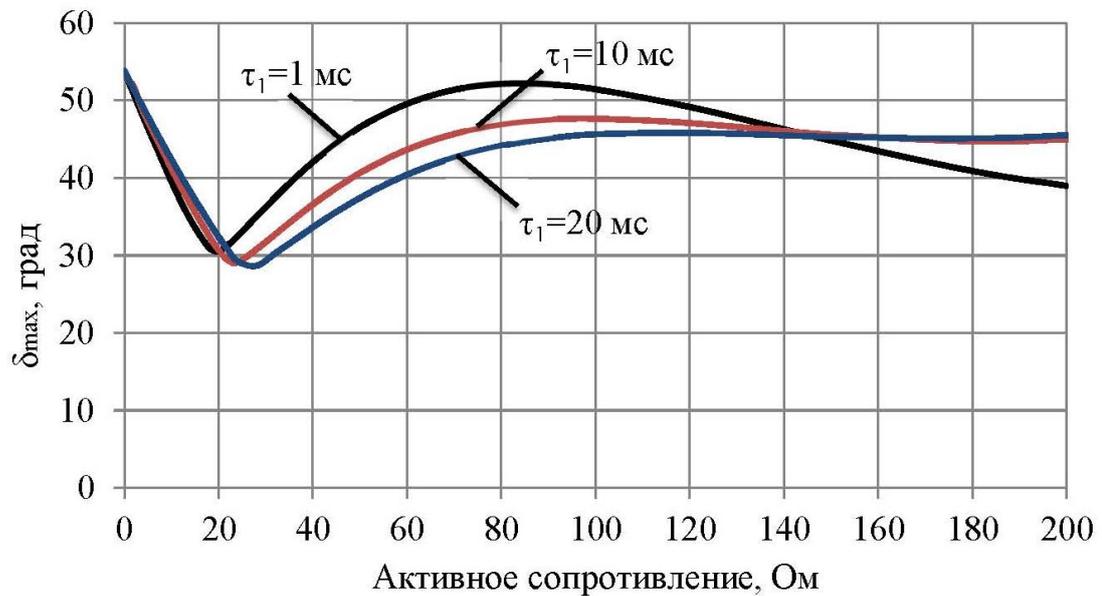


Рисунок 4.11 – Зависимость амплитуды относительного угла ротора генератора от активного сопротивления трансформатора

На рисунках 4.12-4.14 приведена мощность, отдаваемая генератором в разных случаях.

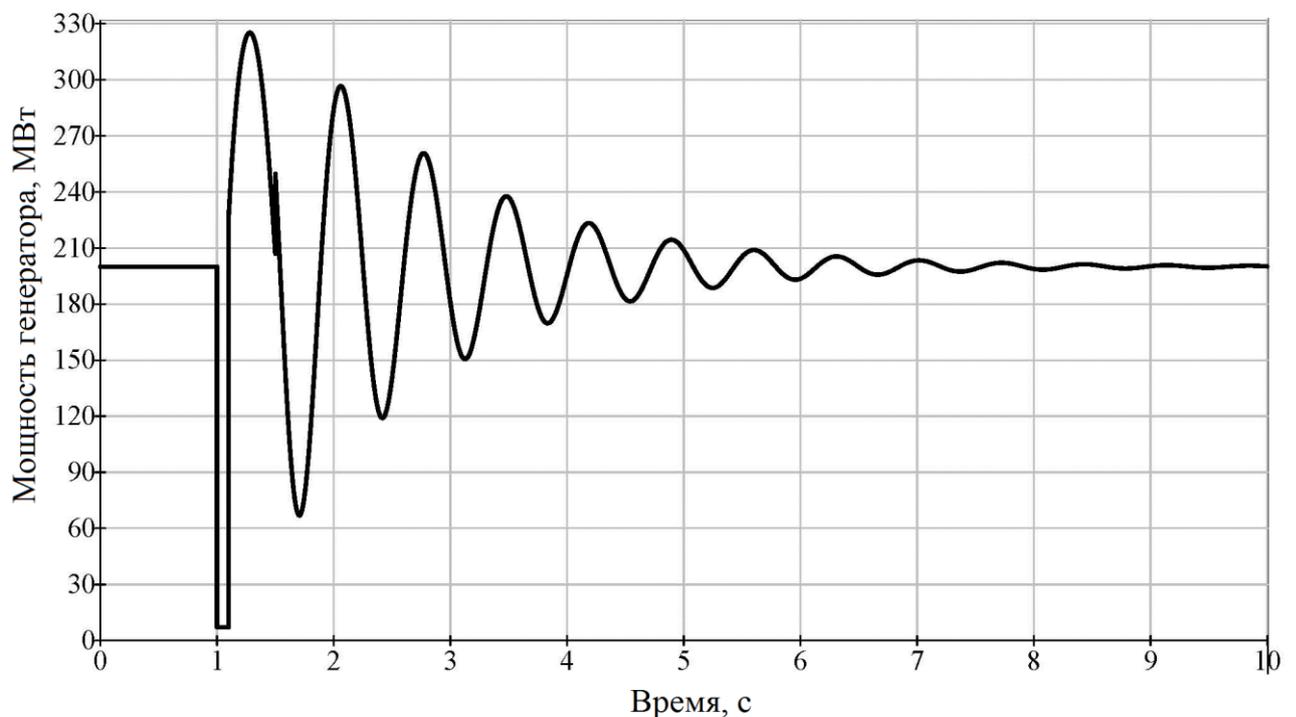


Рисунок 4.12 – Мощность генератора в случае использования обычного трансформатора

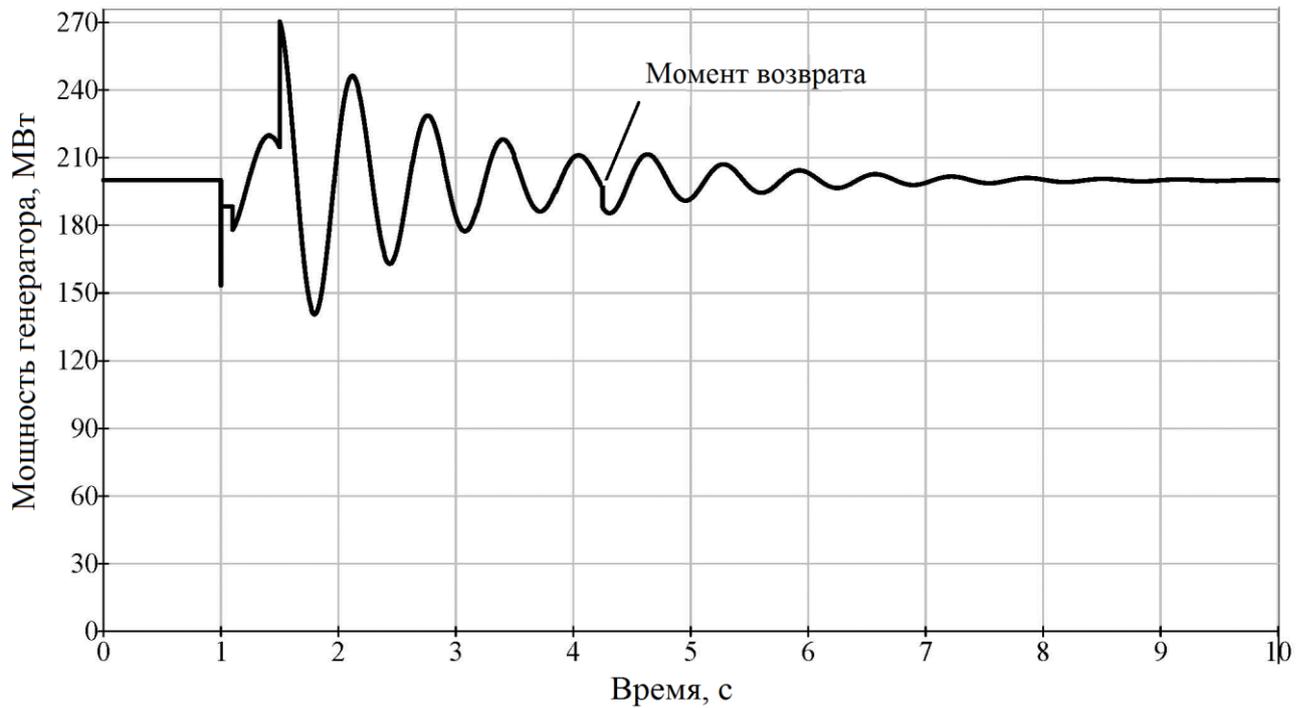


Рисунок 4.13 – Мощность генератора в случае использования СПТ при $R=20 \text{ Ом}$

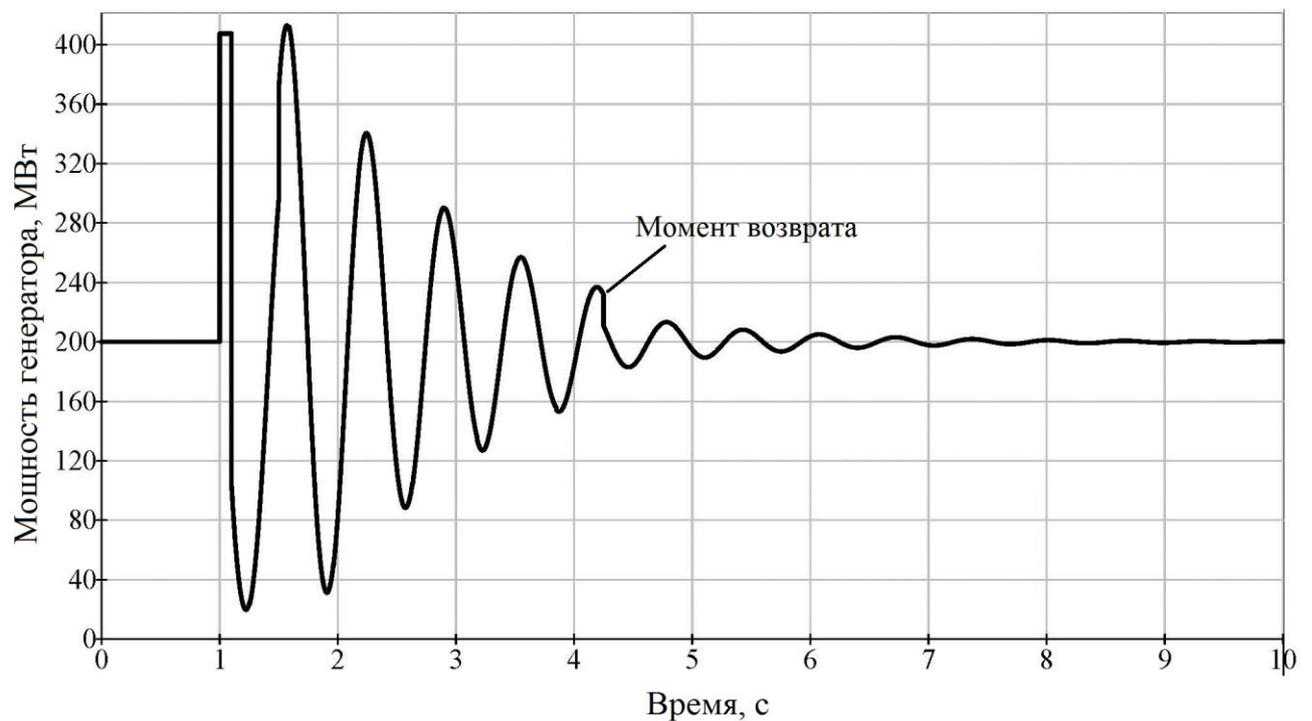


Рисунок 4.14 – Мощность генератора в случае использования СПТ при $R=60 \text{ Ом}$

Далее приводятся расчеты, проведенные в ПВК АТР ЕМТР, снабженном графическим интерфейсом и поставляемого в комплекте с библиотеками стандартных компонентов электрических сетей. В настоящее время во всем мире исследователи-электроэнергетики широко используют программу расчета электро-

магнитных переходных процессов EMTP (ElectroMagnetic Transient Program) и ее некоммерческую версию ATP (Alternative Transient Program). EMTP – универсальная система программирования для цифрового моделирования переходных явлений как электромагнитного, так и электромеханического характера. С помощью этой программы могут моделироваться сложные сети и системы управления произвольной структуры. EMTP используется для анализа коммутационных и грозовых перенапряжений, исследования координации изоляции и вращательных колебаний электрических машин, моделирования релейной защиты и гармонического анализа, изучения проблем качества электроэнергии и электромагнитной совместимости и т.д. [71].

Для более наглядного представления влияния СПТ на переходные процессы момент инерции генератора задается большой величиной, в целях исключения качаний ротора генератора. На рисунке 4.15 показана кривая тока во время и после устранения КЗ.

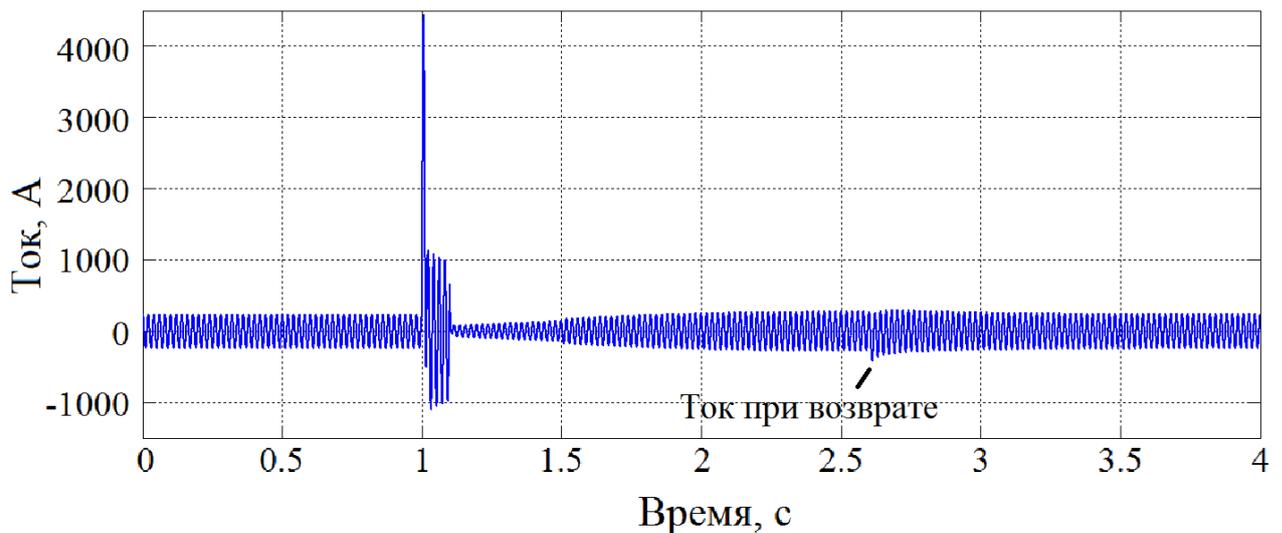


Рисунок 4.15 – Ток, протекающий через СПТ на стороне ВН при $R_{СПТ}=160 \text{ Ом}$
и $t_{возврата}=1,5 \text{ с}$

Из рисунка 4.15 видно, что ток КЗ ограничивается активным сопротивлением трансформатора, как и ток нагрузки после устранения КЗ. В момент возврата СПТ в СП состояние всплеск тока зависит от величины активного сопротивления при возврате и от времени возврата. Зависимость этого всплеска от времени возврата приведена на рисунке 4.16.

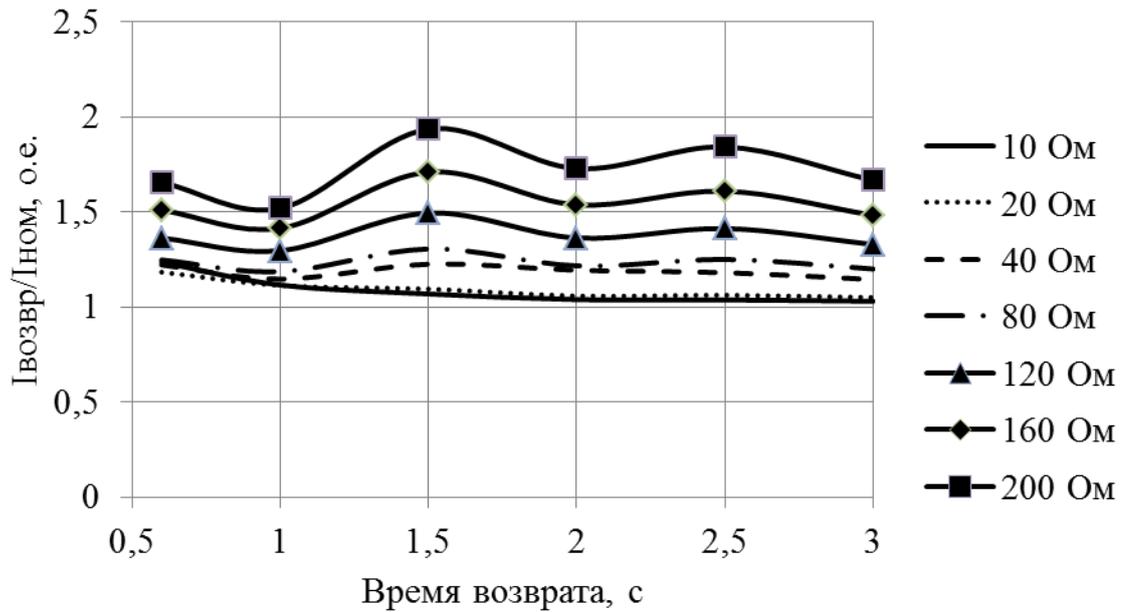


Рисунок 4.16 – Зависимость тока при возврате от времени возврата при различных значениях активного сопротивления СПТ

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 проиллюстрировано на рисунке 4.17.

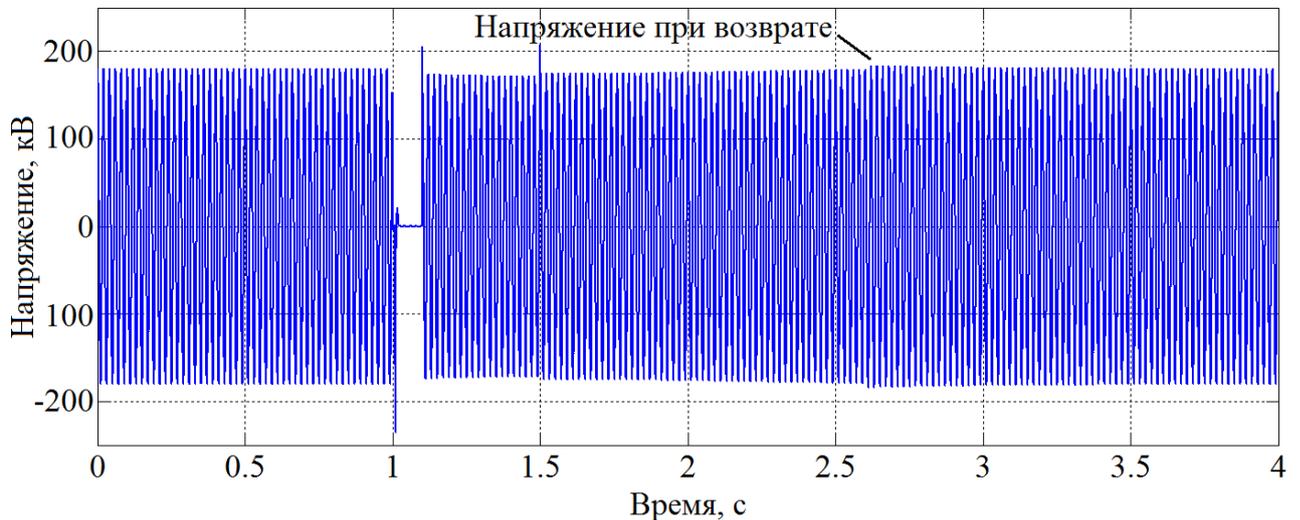


Рисунок 4.17 – Напряжение на выводах СПТ при $R_{\text{СПТ}}=160$ Ом и $t_{\text{возврата}}=1,5$ с

На рисунке 4.18 приведена зависимость напряжения на выводах СПТ в момент возврата от времени возврата при разных значениях активного сопротивления.

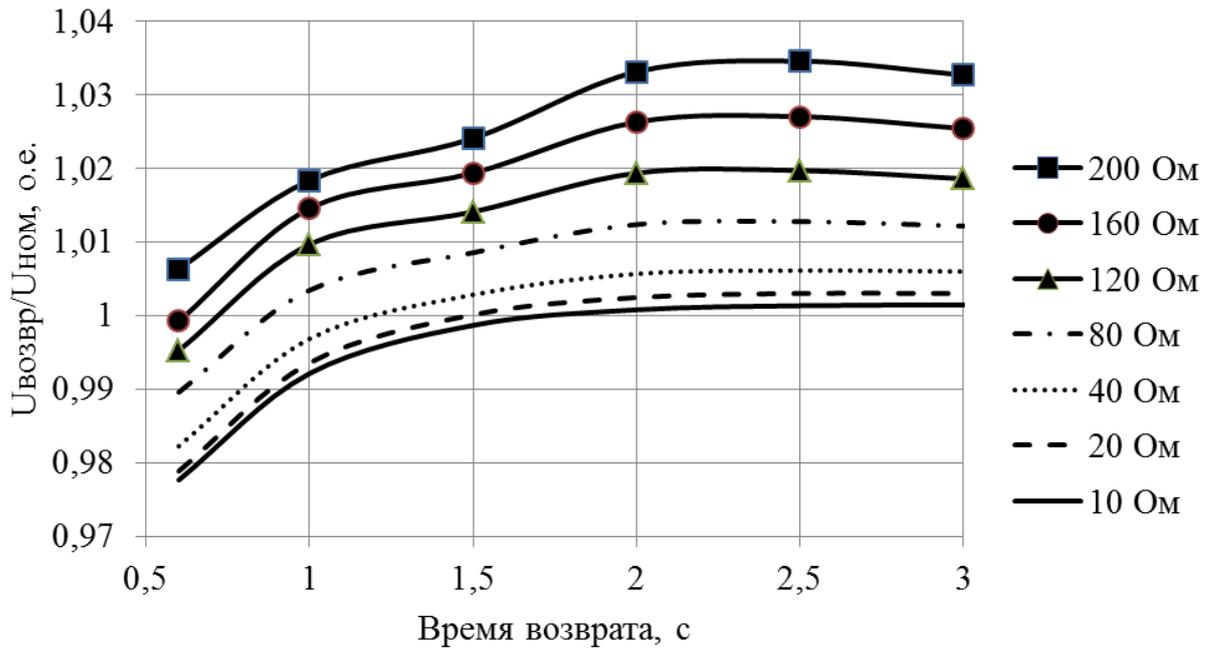


Рисунок 4.18 – Зависимость напряжения при возврате от времени возврата при различных значениях активного сопротивления СПТ

Величина всплесков напряжения, как собственно и всплесков тока не велики при значениях активного сопротивления вблизи $R_{\text{СПТ}} \approx 20$ Ом для рассматриваемого примера (рисунок 4.1).

На рисунке 4.19 показано падение напряжения на активном сопротивлении сверхпроводникового трансформатора во время и после устранения КЗ.

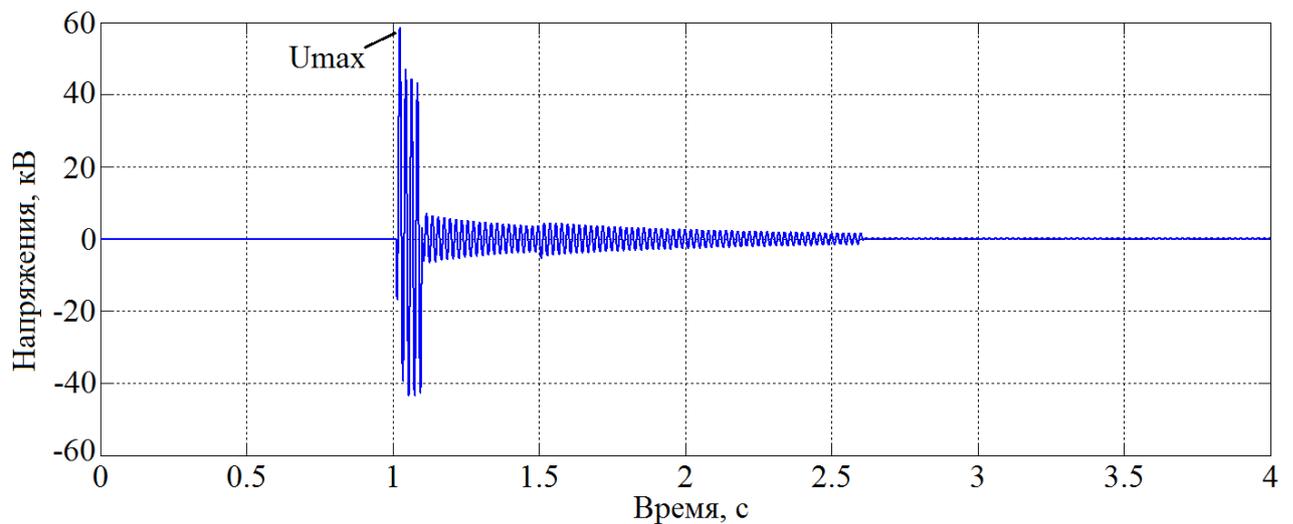


Рисунок 4.19 – Падение напряжения на активном сопротивлении СПТ при $R_{\text{СПТ}}=20$ Ом и $t_{\text{возврата}}=1,5$ с

На рисунке 4.20 показана зависимость максимального напряжения от величины активного сопротивления

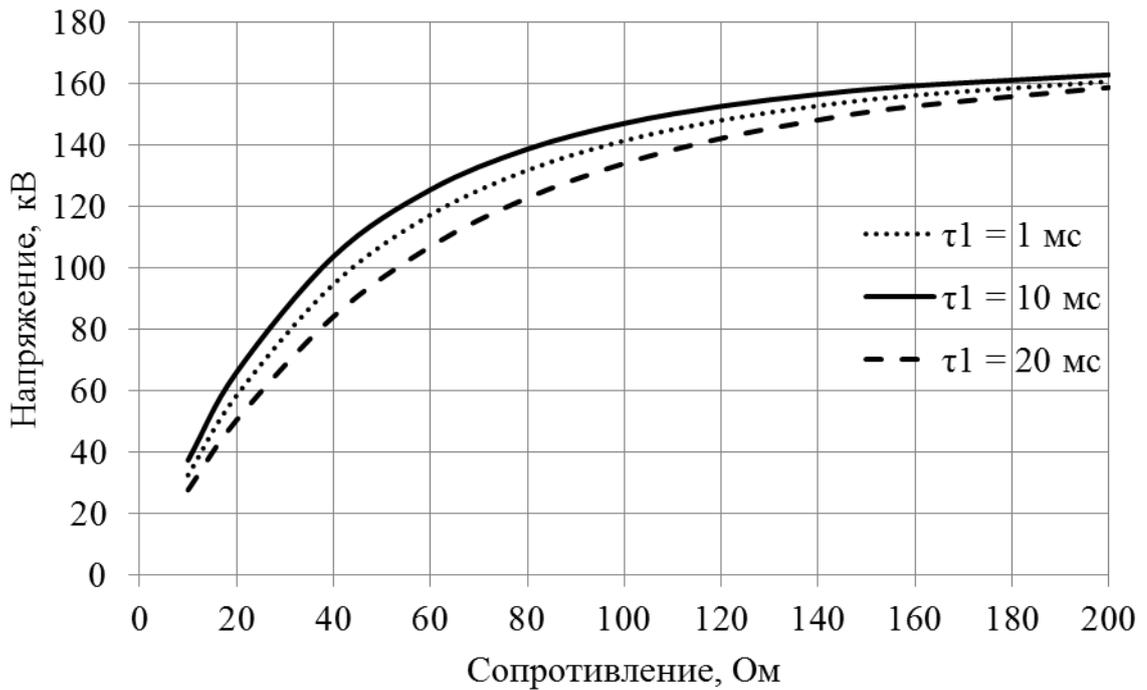


Рисунок 4.20 – Зависимость падения напряжения от величины активного сопротивления при разных постоянных времени нарастания активного сопротивления

Из рисунков 4.19 и 4.20 видно, что для оптимального активного сопротивления величиной 20 Ом падение напряжения равно 60 кВ. Необходимо отметить, что изоляция обмоток должна быть рассчитана на то, чтобы выдерживать эти перенапряжения.

Количество теплоты, которое выделяется на активном сопротивлении, играет значительную роль с позиции условий возврата. Мощность, выделяющаяся на активном сопротивлении СПТ, имеет вид, приведенный на рисунке 4.21.

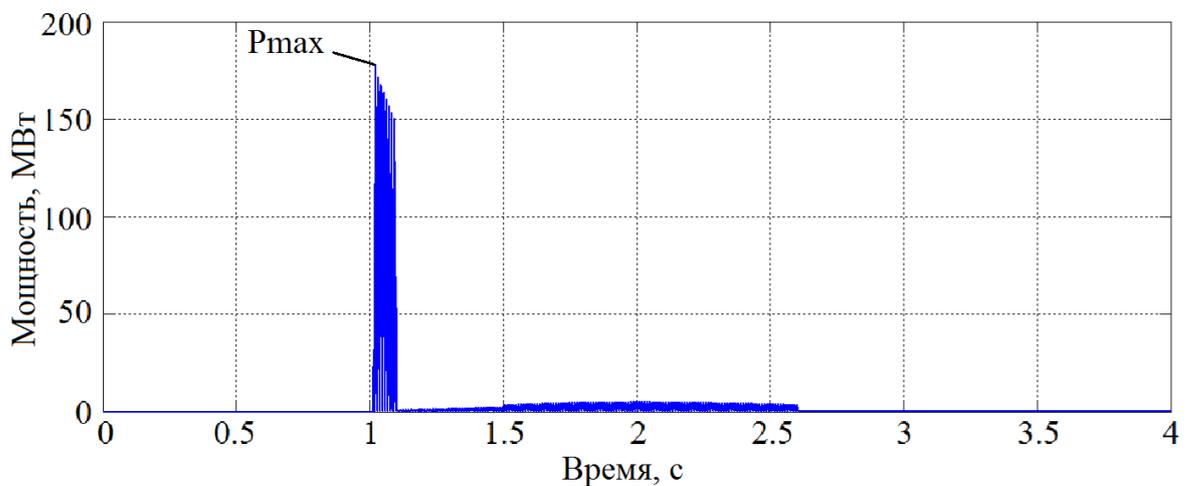


Рисунок 4.21 – Мощность, выделяющаяся на активном сопротивлении СПТ

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 4.22.

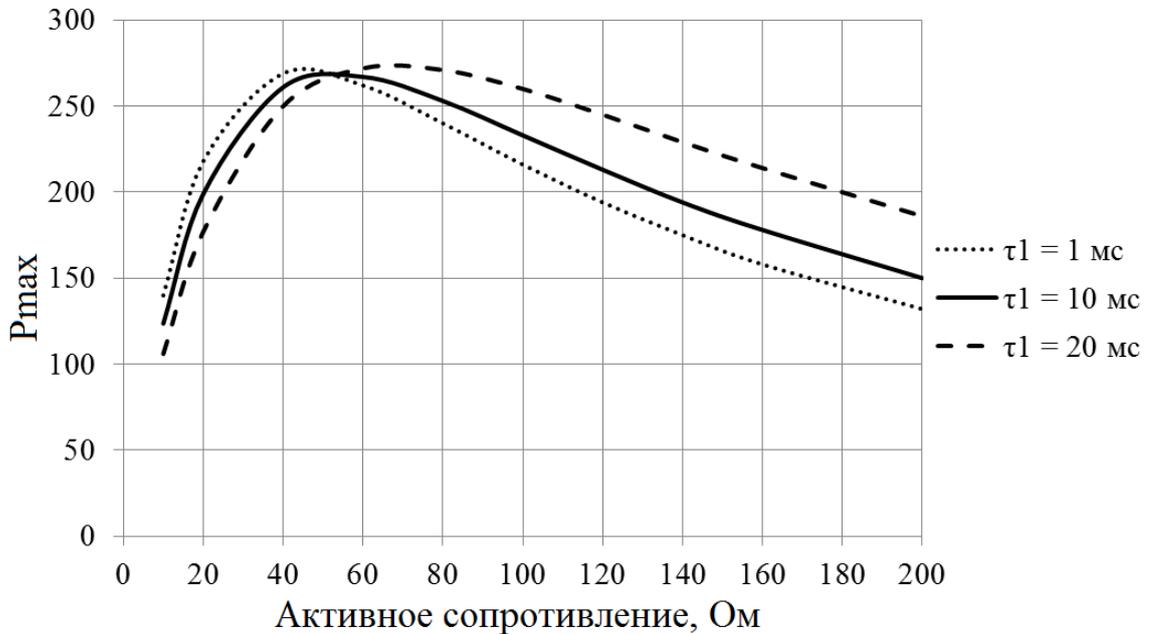


Рисунок 4.22 – Зависимость максимальной мощности от величины активного сопротивления при разных значениях постоянных времени нарастания активного сопротивления

На рисунке 4,23 приведено количество теплоты, выделяющееся на активном сопротивлении, за время КЗ и во время возврата СПТ.

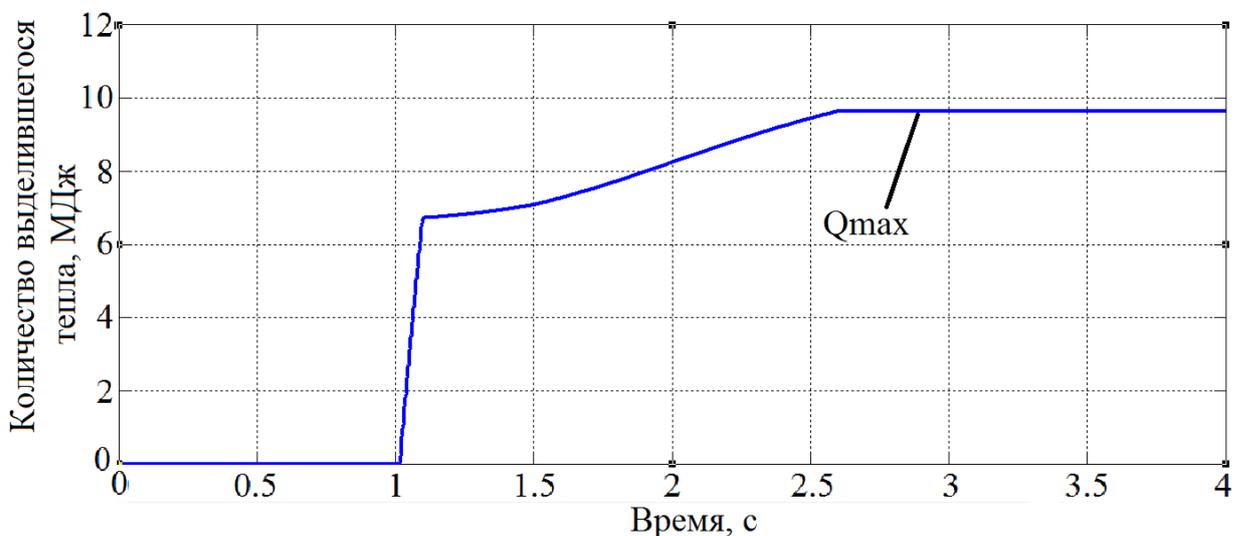


Рисунок 4.23 – Количество выделившегося тепла при $R_{СПТ}=160$ Ом и $t_{возврата}=1,5$ с

На рисунке 4.24 показано максимальное количество теплоты, выделившееся на момент возврата СПТ в сверхпроводящее состояние.

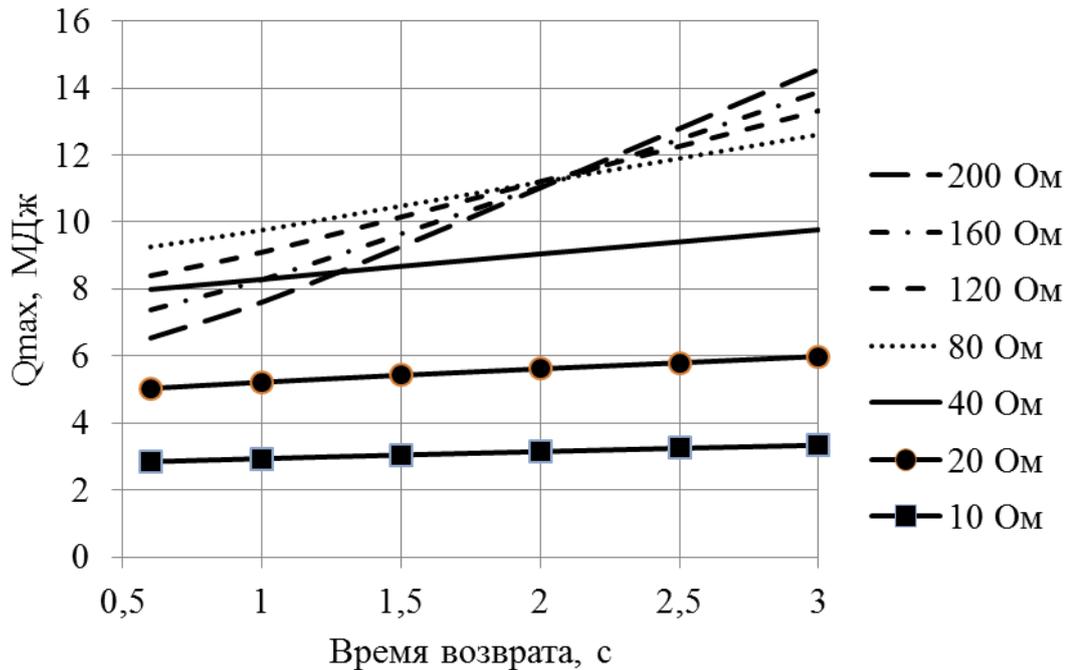


Рисунок 4.24 – Зависимость выделившегося количества тепла от времени возврата при различных значениях активного сопротивления СПТ

Из построенных графиков 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.

Теплоемкости обмоток и охлаждающей жидкости должны быть рассчитаны для восприятия выделяющегося тепла, а длительность КЗ должна быть ограничена.

Нужно отметить, что в случае невозврата СПТ в СП состояние после ограничения тока КЗ необходимо отключать трансформатор для его возврата в СП состояние, также необходимо отметить, что длительность протекания тока КЗ ограничивается толщиной стабилизатора. Однако, при большей толщине стабилизато-

ра в нормальном режиме в стабилизаторе возникают бóльшие потери на вихревые токи и в аварийном режиме появляется меньшее ограничивающее сопротивление.

4.5. Выводы

1. СПТ существенно влияют на электромеханические переходные процессы. Статическая устойчивость улучшается в связи с меньшим индуктивным сопротивлением СПТ. Показано, что коэффициент запаса увеличивается до 20%.

2. Динамическая устойчивость может, как улучшиться, так и ухудшиться в зависимости от величины активного сопротивления. Активное сопротивление СПТ, появляющееся в аварийном режиме, ограничивает ток короткого замыкания и компенсирует сброс мощности генератора. Амплитуда аварийной характеристики генератора оказывается несоизмеримо выше амплитуды аварийной характеристики генератора в случае с традиционным трансформатором. Показано, что при некотором значении активного сопротивления аварийная характеристика оказывается почти равной доаварийной, что обеспечивает минимальные колебания угла ротора генератора. Выдвинут критерий улучшения динамической устойчивости в случае использования СПТ.

3. Показано, что чрезмерно большие величины активного сопротивления могут привести к чрезмерному торможению ротора генератора, что в свою очередь может привести к выпадению генератора из синхронизма.

4. Таким образом, применение СПТ позволит повысить предел передаваемой мощности, а использование функции ограничения токов КЗ позволит повысить динамическую устойчивость системы, тем самым обеспечить надежность электроснабжения потребителей.

5. ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К СВЕХПРОВОДНИКОВЫМ ТРАНСФОРМАТОРАМ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

5.1. Постановка задачи

Сформулируем несколько требований, которым должны отвечать параметры СПТ, рассмотрев их с точки зрения устойчивости электрической нагрузки, коммутационной способности высоковольтного выключателя и ограничения тока КЗ с необходимой глубиной при успешном возврате после устранения КЗ.

С целью выяснения наиболее пригодного места установки СПТ, с точки зрения технико-экономических параметров, требуется провести расчеты. В данной главе предполагается технико-экономическое сравнение использования СПТ мощностью 40 МВА с соотношением напряжений высокой и низкой стороны 115/11 кВ с традиционным трансформатором ТДН-40000/110 с аналогичными параметрами мощности и соотношением напряжений. Трансформаторы мощностью 40 МВА применяются в системах электроснабжения крупных промышленных предприятий в качестве трансформаторов главных понизительных подстанций. Место установки трансформатора принимается г. Новосибирск. В ходе расчетов предстоит оценить капиталовложения в объект, потери электроэнергии за год с учетом установленного тарифа, экономию издержек и определить срок окупаемости объекта. Таким образом, проведя технико-экономические расчеты, можно будет оценить коммерческую эффективность применения СПТ. Коммерческая эффективность определяется сопоставлением затрат и получаемого эффекта. В качестве затрат рассматриваются общие годовые эксплуатационные расходы, а в качестве получаемого эффекта – экономия затрат на потери электроэнергии в случае применения СПТ.

Сравниваемые варианты отвечают условиям энергетической сопоставимости (одинаковый энергетический эффект у потребителя, одинаковое качество энергоснабжения потребителей) и условиям экономической сопоставимости (сравнение в сопоставимых ценах, в одном временном периоде).

5.2. Формирование требований

5.2.1. Требование с точки зрения устойчивости нагрузки

Для промышленных предприятий со сложными и непрерывными технологическими процессами актуальной является проблема устойчивости электрической нагрузки при возмущениях в системах электроснабжения. При проектировании СПТ необходимо учитывать требования к его параметрам, которые будут предъявлены с позиции обеспечения устойчивости электрической нагрузки, для этого рассмотрим влияние СПТ с функцией токоограничения на динамическую устойчивость нагрузки, запитанной через него. Короткие замыкания приводят к кратковременным нарушениям электроснабжения (КНЭ) потребителей. Продолжительность КНЭ составляет от 0,1 с до нескольких секунд, тем не менее, несмотря на малую продолжительность возмущений, они могут вызвать потерю динамической устойчивости узлов электрической нагрузки [72]. Возмущения во внутренней или внешней части системы электроснабжения (СЭС) проявляются в виде провалов напряжения определенной глубины и длительности. При симметричных аварийных возмущениях в электрических сетях остаточное напряжение узла характеризуется действующим значением. При несимметричных аварийных возмущениях остаточное напряжение характеризуется действующими значениями симметричных составляющих, устойчивость узла зависит от значений прямой и обратной составляющих напряжения. Для узлов электрической нагрузки напряжение является первичным параметром определяющим режим узла, поэтому границы устойчивости определяются в координатах напряжения или его составляющих [72].

Граница статической устойчивости узла электрической нагрузки при симметричных возмущениях определяется одним параметром - значением напряжения статической устойчивости $U_{су}$, измеряемом в относительных единицах (о.е.). $U_{су}$ – минимальным значением ЭДС, при установлении которого не происходит лавинообразного снижения напряжения. Граница динамической устойчивости узла электрической нагрузки при симметричных возмущениях определяется как за-

висимость $\tau(u)$ - максимально допустимого времени τ (с) возмущения от величины остаточного напряжения. Величина τ_0 – максимально допустимое время существования возмущения, не вызывающего нарушения динамической устойчивости узла нагрузки при остаточном напряжении, равно нулю [73].

Даже при токоограничении с помощью СПТ для предотвращения повреждения электродвигателей, затормозившихся в результате КНЭ, а также для облегчения условий самозапуска и автоматического повторного пуска ответственных механизмов используется защита минимального напряжения (ЗМН). В качестве исходного ориентира критериев устойчивости электрической можно принять положения п. 3.3.85 и п. 5.3.52 ПУЭ [74]. Уставку ЗМН рекомендуется принимать равной $0,7 \cdot U_{НОМ}$, а время срабатывания от 0,5 до 1,5 сек. Можно использовать эти значения для формирования требования к параметрам СПТ при токоограничении с помощью него.

Остаточное напряжение на шинах ($U_{ОСТ}$) при токоограничении во время КЗ с помощью СПТ определяется как

$$\frac{U_{ОСТ}}{\sqrt{3} \cdot E_{ЭКВ}} = \frac{Z_{СПТ}}{Z_{ЭКВ} + Z_{СПТ}} = \frac{\left(\frac{Z_{СПТ}}{Z_{ЭКВ}} \right)}{1 + \left(\frac{Z_{СПТ}}{Z_{ЭКВ}} \right)} \quad (5.1)$$

Напряжение, при котором не происходит лавинообразного снижения напряжения ($U_{СУ}$), в относительных единицах $U_{СУ}^* = U_{СУ} / U_{НОМ}$, тогда с учётом этого получаем, что

$$U_{СУ}^* = \frac{\left(\frac{Z_{СПТ}}{Z_{ЭКВ}} \right)}{1 + \left(\frac{Z_{СПТ}}{Z_{ЭКВ}} \right)}, \quad (5.2)$$

отсюда определяется искомое сопротивление СПТ, при котором сохраняется устойчивость нагрузки

$$Z_{СПТ} = \frac{U_{СУ}^* \cdot Z_{ЭКВ}}{1 - U_{СУ}^*}. \quad (5.3)$$

Отношение сопротивления СПТ к сопротивлению ЭЭС

$$\frac{Z_{СПТ}}{Z_{ЭКВ}} = \frac{U_{СУ}^*}{1 - U_{СУ}^*}, \quad (5.4)$$

Зависимость отношения сопротивлений СПТ и ЭЭС от напряжения устойчивости нагрузки в относительных единицах представлена на рисунке 5.1, на котором область устойчивости нагрузки по напряжению располагается над приведённой кривой.

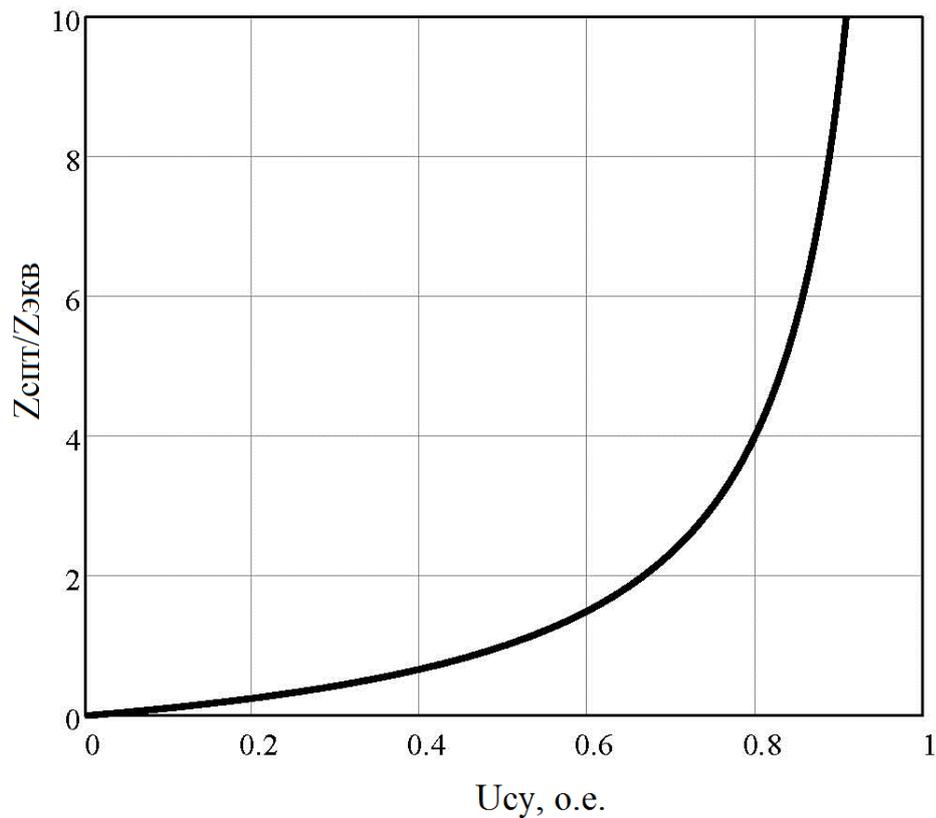


Рисунок 5.1 – Зависимость отношения сопротивления СПТ и ЭЭС от минимального напряжения устойчивости нагрузки

5.2.2. Требование с точки зрения критического тока

Критический ток важнейший параметр, влияющий на многие аспекты устройства СПТ. Согласно информации, приведенной в главе 2, потери в обмотках СПТ являются функцией, зависящей от критического тока. С одной стороны для повышения экономической эффективности СПТ необходимо увеличение критической плотности тока, с другой стороны чрезмерное повышение критического

тока может значительно увеличить потери в обмотках. В [75] приведены исследования, посвященные данному вопросу, и на рисунке 5.2 показана зависимость потерь от величины критического тока.

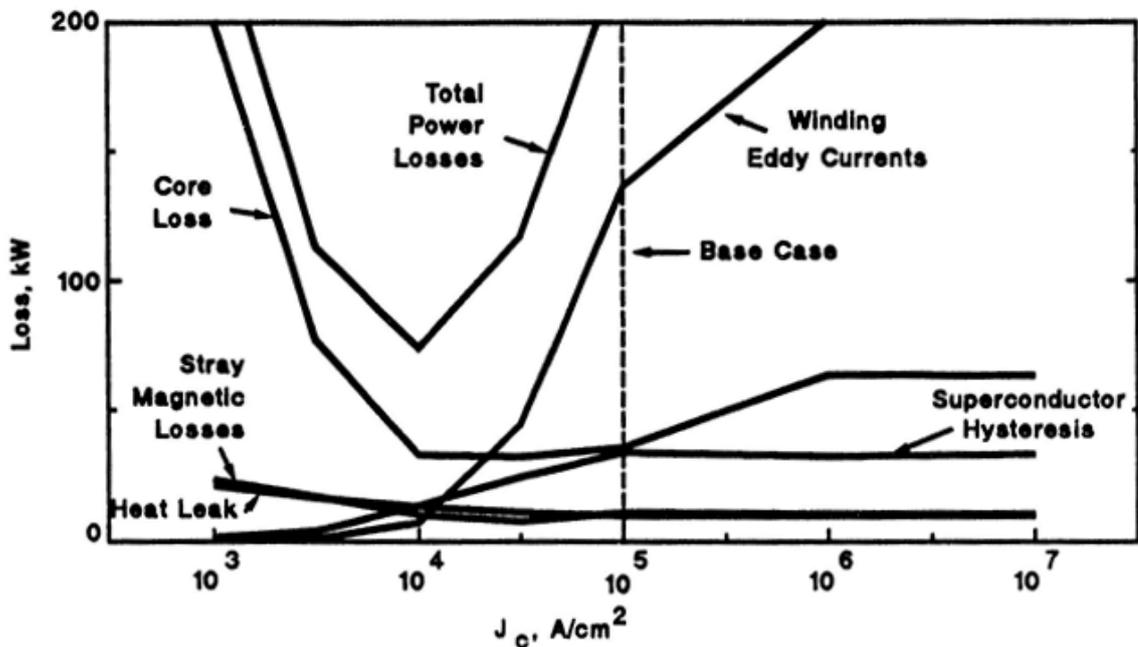


Рисунок 5.2 – Зависимость потерь от критического тока [75]

Таким образом, величина критического тока должна быть в диапазоне 100 – 1000 A/mm^2 (на сегодняшний день достигнуты значения критического тока 250 – 300 А для ленты SCS12050 производства фирмы SuperPower).

5.2.3. Требования с точки зрения ограничения тока КЗ

Из изложенного в гл. 3, в частности в пп. 3.2-3.4 следует, что необходимо подбирать значения активного сопротивления СПТ для эффективного ограничения тока КЗ и возврата в СП состояние с минимальным ущербом рабочему режиму.

Предполагая, что активное сопротивление СПТ в начальный момент короткого замыкания соответствует температуре 77 К, для достаточного ограничения тока КЗ должно выполняться условие

$$R_{СПТ}(77) > R_{MIN}, \quad (5.5)$$

где $R_{СПТ}(77)$ – активное сопротивление СПТ при температуре жидкого азота;

R_{MIN} – минимальное требуемое активное сопротивление для ограничения тока КЗ.

В условиях токоограничения должно выполняться условие по максимально возможной температуре

$$T_{ПРОВОДА}(t_{откл}) < T_{MAX}, \quad (5.6)$$

где $T_{ПРОВОДА}(t_{откл})$ – температура провода на момент устранения КЗ;

T_{MAX} – максимальная допустимая температура по условиям возврата, механической прочности и т.д.

В п. 5.2.1 сформулированное требование по устойчивости нагрузки подразумевает под собой то, что

$$R_{СПТ}(T_{MAX}) < R_{MAX}, \quad (5.7)$$

где $R_{СПТ}(T_{MAX})$ – активное сопротивление СПТ на момент устранения КЗ;

R_{MAX} – максимально допустимое значение активного сопротивления по условию остаточного напряжения.

Для быстрого возврата в СП состояние электрически подведенная мощность (к оставшемуся активному сопротивлению) должна быть меньше мощности, которая отводится термически тепловым потоком. Это реализуется тем, что $R_{СПТ}$ подбирается путем выбора необходимой толщины стабилизатора ВТСП провода. Тогда с учетом выражений (3.5) и (3.6)

$$R_{СПТ.MAX}(T_{MAX}) = \frac{q(T_{MAX})A}{I_{ВОЗВР}^2(T_{MAX})}, \quad (5.8)$$

где $I_{ВОЗВР}$ – нагрузочный ток, при котором происходит возврат в СП состояние.

Следовательно

$$R_{СПТ}(T_{MAX}) < R_{СПТ.MAX}(T_{MAX}) \quad (5.9)$$

Возврат трансформатора после ограничения тока КЗ является одним из важнейших параметров данного устройства. Длительная работа обмоток в нормальном состоянии приводит к большим потерям и соответственно к значительным тепловыделениям. Поэтому необходимо, чтобы СПТ возвращался в СП состояние как можно быстрее. Однако с другой стороны, возврат СПТ в момент

времени близкому моменту АПВ линии вызывает колебания мощности и угла ротора генератора (при установке вблизи генератора). Следовательно, время возврата СПТ должно быть больше времени повторного включения линии

$$t_{\text{возврата}} > t_{\text{АПВ.линии}} \cdot \quad (5.8)$$

При этом угол ротора генератора должен находиться в области площадки торможения для сохранения устойчивой работы системы.

Необходимо подчеркнуть, что общая теплоемкость обмоток и охлаждающей жидкости должна быть соответствующей для восприятия тепла, выделившегося во время КЗ.

5.3. Оценка коммерческой эффективности применения сверхпроводниковых трансформаторов

Экономия электроэнергии – одна из важнейших задач. Чтобы ее решить, необходим показатель, с которым можно было бы сравнить фактические достижения предприятий; таким показателем является потенциальная возможность экономии электроэнергии, допустимая по экономическим соображениям при внедрении новейших достижений науки и техники, организационно-технических мероприятий и т.д; оптимальным считается мероприятие обеспечивающее минимум приведенных годовых затрат [76].

Показателем режима электропотребления за год в целом является продолжительность (или число часов использования) наибольшей нагрузки (рисунок 5.3).

Потери в трансформаторе за год определяются выражением

$$\Delta W = \Delta P_{XX} \cdot t + \Delta P_{KЗ} \cdot \beta^2 \cdot \tau, \quad (5.6)$$

где ΔP_{XX} - потери холостого хода; t - время работы; $\Delta P_{KЗ}$ - потери короткого замыкания; β - коэффициент загрузки в период годового максимума; τ - время наибольших потерь.

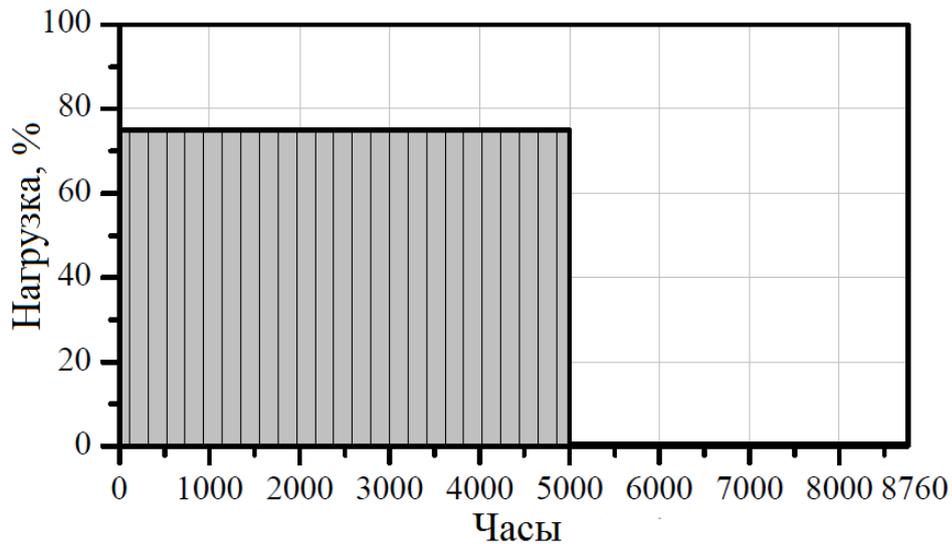


Рисунок 5.3 – Годовой график нагрузки трансформатора

Время наибольших потерь равно [77]

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_{\max}}{10000} \right) 8760, \quad (5.7)$$

где T_{\max} - число часов использования максимума нагрузки.

$$\tau = \left(0,124 + \frac{5000}{10000} \right) 8760 = 3411.$$

Потери электроэнергии в ТДН-40000/110

$$\Delta W_{ТДН} = 34 \cdot 8760 + 170 \cdot 0,75^2 \cdot 3411 = 624010,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Соответственно приведенному годовому графику нагрузки, выражениям (2.1) и (2.2) потери электроэнергии в СПТ за год равны

$$\Delta W_{СПТ} = 16,3 \cdot 8760 + 13,056 \cdot 0,75^2 \cdot 3411 = 168013,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Если рассматривать применение трансформатора в составе главной понижающей подстанции (ГПП) промышленного предприятия, то тарифы на электроэнергию для промышленных потребителей, как правило, устанавливаются по итогам рыночных торгов. Нерегулируемые цены на электроэнергию, устанавливаемые для данного региона, можно посмотреть на сайте гарантирующего поставщика электроэнергии в данном регионе.

Для иных, кроме населения, категорий потребителей тарифы на электроэнергию могут дифференцироваться в зависимости от уровня напряжения, времени суток, учета потребляемой мощности.

Тарифы на электроэнергию в зависимости от уровня напряжения делятся на тариф для потребителей

- высокого напряжения – 110 кВ и выше;
- среднего первого напряжения – 35 кВ;
- среднего второго напряжения – 20-1 кВ;
- низкого напряжения – 0,4 кВ и ниже.

По времени суток тариф на электроэнергию дифференцируется:

- ночная зона с 23:00 до 7:00
- полупиковая зона 10:00 до 17:00 и с 21:00 до 23:00
- пиковая зона 7:00 до 10:00 и с 17:00 до 21:00

Платеж за электроэнергию может так же рассчитываться из двух составных частей

- ставки тарифа на электроэнергию
- ставки тарифа на мощность

Кроме того, тариф на электроэнергию может различаться в зависимости от того, насколько полно потребитель использует выделенную ему мощность (так называемого числа часов использования заявленной мощности).

На сайте ОАО «Новосибирскэнергосбыт» приведены предельные уровни нерегулируемых цен на электрическую энергию (мощность), поставляемую потребителям (покупателям) ОАО "Новосибирскэнергосбыт" за июнь 2013 г.

Примем для первой ценовой категории (для объемов покупки электрической энергии (мощности), учет которых осуществляется в целом за расчетный период) тариф в соответствии с уровнем напряжения ВН 1787 рублей/МВт·ч с учетом НДС.

Тогда стоимость потерь за год для трансформатора ТДН–40000/110 составят следующую величину

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta W_{ТДН} \cdot C = 624,01 \cdot 1787 = 1115107 \text{ руб.}$$

Для СПТ

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta W_{СПТ} \cdot C = 141,2 \cdot 1787 = 300239,4 \text{ руб.}$$

Далее определим рыночные цены на сравниваемые трансформаторы на текущий 2013 год.

При предварительной оценке объемов капитальных вложений в объекты на начальных стадиях проектирования используют укрупненные показатели стоимости. Это обусловлено тем, что на данной стадии отсутствует детальная техническая информация об объекте. Все укрупненные показатели составляются на основе действующих прейскурантов цен на материалы и оборудование, анализа сметных расчетов к проектам ряда конкретных объектов, а также нормативных документов и типовых проектов.

По данным прайс-листов электронного каталога ООО «Тольяттинский трансформатор» цена за трансформатор ТДН-40000/110 составляет 1217,74 тыс. долларов США за единицу. По курсу ЦБ РФ на 19.05.13 цена составляет 38 228 634 рублей.

Цену за СПТ определить с учетом его составных элементов представляется довольно трудным, в связи с тем, что подобные трансформаторы и его составные элементы практически не представлены на рынке и в общем доступе их определить не представляется возможным.

На основании [78] стоимость СПТ в сопоставлении с трансформатором традиционного исполнения выше в 2 раза с учетом всех вспомогательных элементов. Примем стоимость СПТ в 2 раза больше стоимости традиционного 76 457 268 рублей по курсу ЦБ РФ на 19.05.13 без учета таможенной пошлины. Определим составляющие условно-постоянных издержек для двух вариантов. Если рассматривать в качестве объекта подстанцию в целом, то структура условно-постоянных издержек определится следующим образом:

$$I_{y-пост}^{нэс} = I_{зн} + I_{нач} + I_{ам} + I_{рем} + I_{пр}, \quad (5.8)$$

где $I_{зн}$ – издержки на заработную плату персонала;

$I_{нач}$ - отчисления на социальные нужды от заработной платы;

$I_{ам}$ - издержки на амортизацию;

$I_{рем}$ - издержки на ремонт и обслуживание;

I_{np} - прочие издержки.

Переменные издержки в ходе расчетов учитывать не будем. Издержки на заработную плату, на социальные нужды и прочие издержки будем считать одинаковыми для обоих рассматриваемых вариантов и в расчетах их не используем.

Определим издержки на амортизацию и ремонт. Как правило, они задаются в процентах от капиталовложений в объект.

Для трансформатора со сроком эксплуатации около 25 лет амортизационные отчисления примем 5%, издержки на ремонт и обслуживание 6% [79].

В реальности нормы амортизации и затраты на ремонт и обслуживание различаются. Это связано с различиями в устройстве рассматриваемых трансформаторов. Соответственно, возникают и разные технологические процессы при эксплуатации трансформаторов и затраты при этом различны.

Примем для обоих вариантов отчисления на амортизацию и ремонт 5 и 6% соответственно, поскольку информацию об издержках, связанных с эксплуатацией СПТ получить не представляется возможным. Хотя, согласно [1] затраты при эксплуатации СПТ будут в несколько раз меньше.

Для сравнительной коммерческой оценки вариантов технических решений определим приведенные затраты для двух вариантов согласно выражению

$$Z = E \cdot K + I_{ам} + I_{рем}, \quad (5.9)$$

где E – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

K – капиталовложения в объект.

Примем $E = 0,15$ [79]. Для трансформатора ТДН–40000/110

$$Z_1 = 0,15 \cdot 38228634 + 1911431,7 + 2293718,04 = 9939444,85 \text{ руб.}$$

Для СПТ

$$Z_2 = 0,15 \cdot 76457268 + 3822863,4 + 4587436,08 = 19878889,7 \text{ руб.}$$

$$Z_2 - Z_1 = 19878889,7 - 9939444,85 = 9939444,85 \text{ руб.}$$

При этом экономия затрат на потери электроэнергии в СПТ составляет $\Delta \mathcal{E} = 814867,6$ рублей.

Очевидно, что за счет высокой стоимости СПТ целесообразность его применения в существующих условиях под вопросом даже при существующем уровне годовых расходов на потери электроэнергии в сети. Срок окупаемости будет непомерно большим и будет превышать срок службы трансформатора.

Определим разницу капиталовложений как

$$\Delta K = K_2 - K_1, \quad (5.10)$$

где K_2 и K_1 – капиталовложения в трансформатор ТДН–40000/110 и СПТ соответственно.

$$\Delta K = 76457268 - 38228634 = 38228634 \text{ руб.}$$

Изменение издержек определится следующим образом

$$\Delta I = (I_{ам2} + I_{рем2}) - (I_{ам1} + I_{рем1}), \quad (5.11)$$

где $I_{ам2}$, $I_{рем2}$, $I_{ам1}$, $I_{рем1}$ – издержки на амортизацию и эксплуатацию, и ремонт для СПТ и трансформатора ТДН–40000/110 соответственно.

$$\Delta I = (3822863,4 + 4587436,08) - (1911431,7 + 2293718,04) = 4205000 \text{ руб.}$$

Эффект от экономии затрат на потери электроэнергии

$$\Delta \mathcal{E} = 865265,4 \text{ руб.}$$

Определим срок окупаемости.

$$T_{ок} = \frac{\Delta K}{\Delta \mathcal{E}} = \frac{38228634}{814867} = 44,1. \quad (5.12)$$

Такой срок окупаемости неприемлем. Однако по прогнозам разных исследовательских центров в ближайшее время ожидается снижение цены на сверхпроводящие провода. И в этой связи определим срок окупаемости для разных цен на СПТ и в разных условиях загруженности. Также очевидно, что полученное значение срока окупаемости не учитывает снижения стоимости СПТ при их серийном производстве. Срок окупаемости определен с учетом двойной стоимости СПТ сравнении с трансформатором традиционного исполнения. Рассчитаем срок окупаемости с учетом реальной перспективы. При этом издержки на эксплуатацию и ремонт в перспективе также должны снижаться. Связано это с доступностью технологий обслуживания и диагностикой, которая уже будет адаптирована под су-

ществующие условия. На рисунках 5.4-5.8 приведены сроки окупаемости в разных условиях.

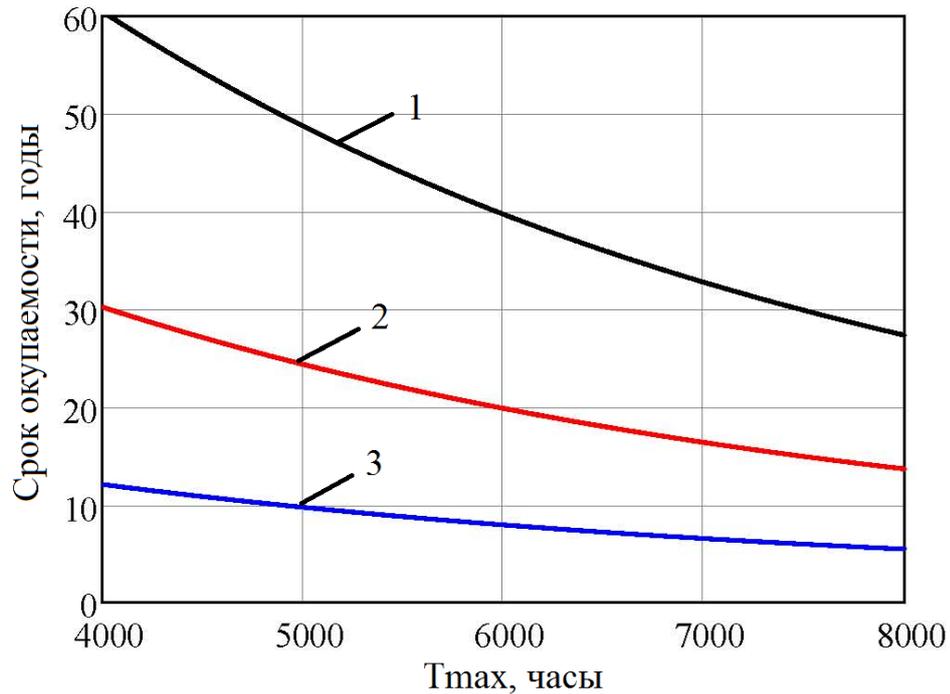


Рисунок 5.4 – Зависимость срока окупаемости от числа часов использования максимума нагрузки при стоимости СПТ большей стоимости традиционного трансформатора: 1 – в два раза; 2 – 1,5 раза; 3 – в 1,2 раза

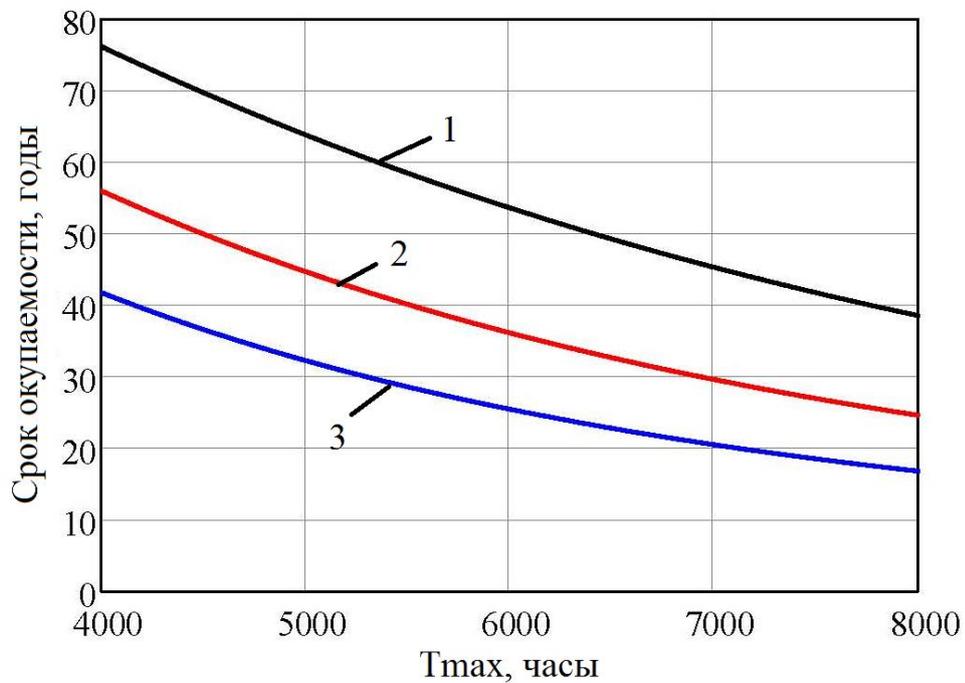


Рисунок 5.5 – Зависимость срока окупаемости от числа часов использования максимальной нагрузки при стоимости СПТ в два раза большей стоимости традиционного трансформатора для: 1 – $\beta = 0,6$; 2 – $\beta = 0,8$; 3 – $\beta = 1,0$

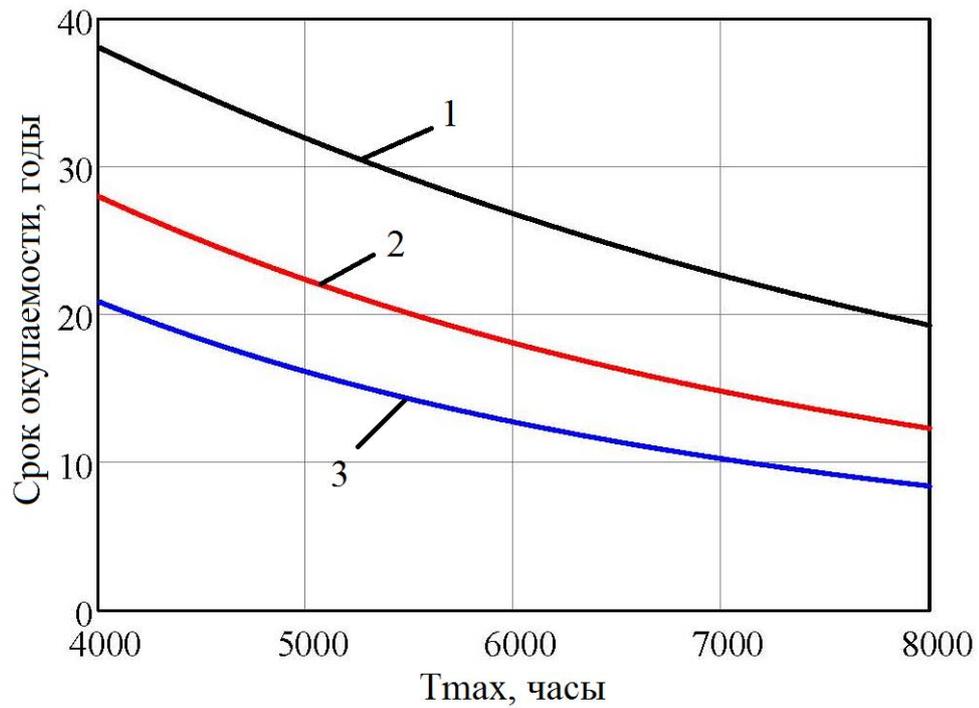


Рисунок 5.6 – Зависимость срока окупаемости от числа часов использования максимальной нагрузки при стоимости СПТ в 1,5 раза большей стоимости традиционного трансформатора для: 1 – $\beta = 0,6$; 2 – $\beta = 0,8$; 3 – $\beta = 1,0$

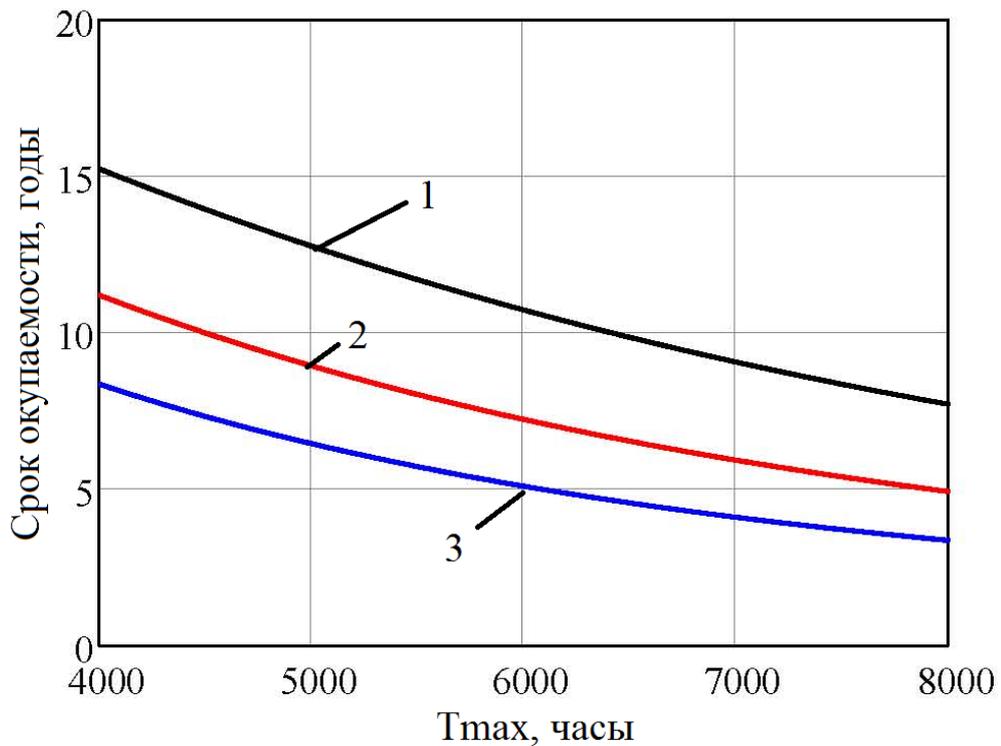


Рисунок 5.7 – Зависимость срока окупаемости от числа часов использования максимальной нагрузки при стоимости СПТ в 1,2 раза большей стоимости традиционного трансформатора для: 1 – $\beta = 0,6$; 2 – $\beta = 0,8$; 3 – $\beta = 1,0$

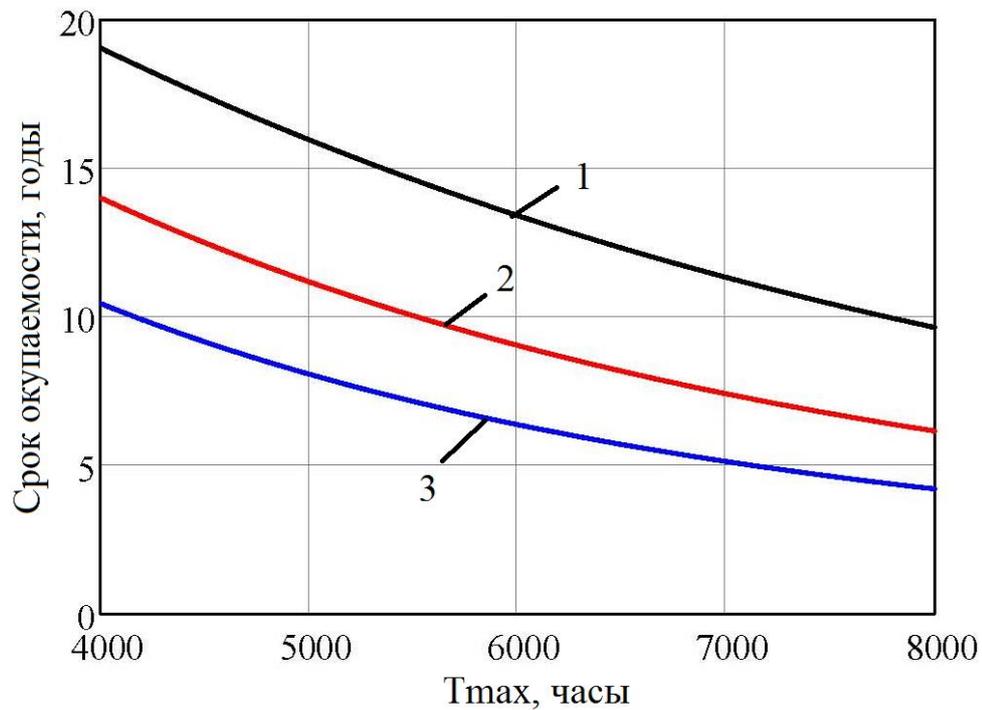


Рисунок 5.8 – Зависимость срока окупаемости от числа часов использования максимальной нагрузки при стоимости СПТ в 1,5 раза большей стоимости традиционного трансформатора и при двойном тарифе на электроэнергию для: 1 – $\beta = 0,6$; 2 – $\beta = 0,8$; 3 – $\beta = 1,0$

Срок окупаемости отражает продолжительность периода, в течение которого сумма чистых поступлений покрывает сумму затрат и в дальнейшем чистый интегральный эффект станет неотрицательным.

Полученные значения срока окупаемости является достаточно приемлемым с коммерческой точки зрения, поскольку срок службы трансформатора составляет около 25 лет.

В общем виде с экономической точки зрения СПТ могут быть:

- а) экономически нецелесообразными (с периодом окупаемости более периода эксплуатации);
- б) экономически целесообразными (с периодом окупаемости более нормативного срока окупаемости, но менее периода эксплуатации);
- в) экономически эффективными (с периодом окупаемости менее или равным сроком окупаемости).

В основном стоимость СПТ определяется количеством ВТСП материалов используемых для изготовления его обмоток и криокуллером, используемого для охлаждения. На сегодня стоимость за погонный метр в зависимости от токонесущей способности составляет: *SP12050-400A*-\$125, *SP2050-240A*-\$75, *SP2050-200A*-\$50 [50]. Информация приведена для общего представления.

Однако по оценкам специалистов фирмы «Siemens» [80], сделанной на основе анализа существующих прототипов СПТ, а также прогноза цен на криогенное оборудование и ВТСП материалы, стоимость СПТ в случае их массового производства будет снижена вследствие серийного выпуска оборудования и будет сопоставима с ценами за трансформаторы традиционного исполнения. Поэтому в перспективе их применение в значительной степени оправдано.

Нужно отметить, что сравнивать цену СП провода и обычного провода за погонный метр не имеет смысла. Цена СП проводов выражается в $\$/(\text{kA}\cdot\text{м})$, которая отражает пропускную способность провода и показывает стоимость пропуска одного килоампера по проводу длиной один метр. Именно этот параметр производители пытаются снизить до приемлемого уровня, т.е. до одного уровня с медным проводом путем повышения величины критического тока. По оценке зарубежных и отечественных исследователей стоимость ВТСП провода второго поколения к 2015 году может приблизиться к стоимости медного провода в перерасчете на $\text{kA}\cdot\text{м}$. Характеристики сверхпроводящих изделий остаются главным фактором, но их рентабельность по-прежнему определяется ценой. Приемлемой ценой на ВТСП провода для нужд НИОКР признаны цены от 300 долл./ $(\text{kA}\cdot\text{м})$ и более, для прототипов изделий – от 100 до 300 $\$/(\text{kA}\cdot\text{м})$, для начального производства – от 25 до 100 $\$/(\text{kA}\cdot\text{м})$. Рентабельной для широкомасштабного использования ВТСП материалов большинство считают цену ниже 25 $\$/(\text{kA}\cdot\text{м})$.

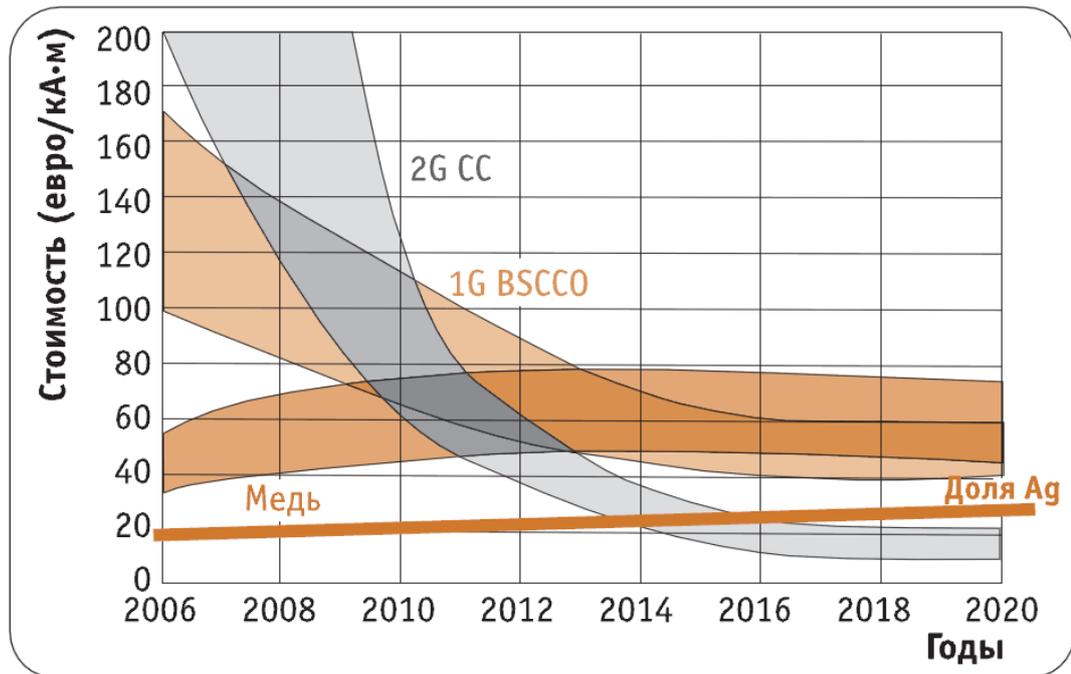


Рисунок 5.9 – Прогноз динамики стоимости сверхпроводников [81]

Вследствие того, что требуется пространство для криостатов, цена ВТСП провода и холодильной установки высока, экономически невыгодно создание СПТ малой мощности. По исследованиям зарубежных ученых экономически оправдан СПТ мощностью не менее 25 МВА, и эта нижняя граница в большей степени определяется стоимостью ВТСП провода и стоимостью охлаждающей установки. Приемлемая цена ВТСП провода для серийного производства СПТ составляет около 25-30\$/кА*м. Стоимость криокуллеров Гиффорда-Макмагона на данный момент составляют около 30 000\$, и для трансформаторов требуется как минимум два криокуллера. Т.е. также необходимо снижение цены на криоустановку, которое может быть в условиях масштабного производства криоустановок (эффект масштаба).

5.4. Сравнительный анализ сопоставляемых вариантов и обоснование целесообразности применения сверхпроводниковых трансформаторов

Приведем сравнительную таблицу преимуществ и недостатков сравниваемых вариантов. Стоимостные и вербальные оценки факторов сведем в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Преимущества и недостатки вариантов

Фактор	ТДН–40000/110	СПТ
Оценочная стоимость, руб.	38 228 634	57 342 951
Затраты при эксплуатации в год, руб.	9 939 444,85	14 909 167,21
Потери электроэнергии за год	Увеличиваются с ростом срока эксплуатации	Снижены примерно на 85%
Повышение эффективности использования источников возобновляемой энергии	нет	да
Использование инновационных технологий	нет	да

Целесообразность использования новых устройств в целом можно определить следующими критериями – достигаемый технический эффект, надежность, затраты на изготовление, затраты на эксплуатацию. Для вновь разрабатываемых устройств с ограниченным опытом промышленной эксплуатации оценка целесообразности их применения возможна лишь по ограниченному числу параметров, сопоставимых с параметрами традиционного оборудования, и с используемыми в настоящее время комплексными техническими решениями, предназначенными для достижения аналогичных целей. В качестве единых комплексных критериев, применимых ко всем группам оборудования (генераторы, трансформаторы, линии, СПИН и т.д.) можно рассматривать определенные удельные величины, такие как плотность энергии, материалоемкость, экономичность, и т.п., позволяющие сравнить новое разрабатываемое оборудование с известным традиционным [82].

Для сравнительного анализа СПТ и традиционного трансформатора целесообразно использовать присущие этим устройствам специфические параметры: удельная мощность, величина потерь, величина индуктивного сопротивления рассеяния, перегрузочная способность, удельная стоимость изделия с учетом эксплуатационных расходов. Можно сделать предварительный вывод о том, что конкурентоспособность СПТ целиком зависит от характеристик используемых материалов, а ее оценка может быть сведена к оценке выигрыша от снижения потерь в обмотках по сравнению с увеличением затрат на изготовление, и в некоторых случаях к

этому может быть присоединен выигрыш от уменьшения массогабаритных показателей.

Таким образом, применение СПТ является обоснованным при их серийном производстве и широком применении, т.к. это позволит снизить их стоимость и затраты на обслуживание с привлечением высококвалифицированного персонала. Также целесообразно применение в комплексе с возобновляемыми источниками энергии и современным высокотехнологичным оборудованием. Это позволит получить значительный синергетический эффект. Использование инновационных технологий будет способствовать переводу экономики страны на инновационный путь развития, который был определен «Стратегией инновационного развития России до 2020 года».

Также стоит отметить, что износ основного оборудования энергетики в целом очень внушителен. Часть оборудования эксплуатируется свыше установленного нормативного срока. Так, например, возрастная структура оборудования ОАО «ФСК ЕЭС» для визуального представления приведена ниже на рисунке 5.10.



Рисунок 5.10 – Возрастная структура оборудования ОАО «ФСК ЕЭС»

Вместе с тем, в последующие 10 лет ожидается значительный рост доли оборудования со сверхнормативным сроком эксплуатации. Физический и мораль-

ный износ может стать причиной возникновения технологических нарушений, несчастных случаев, а также роста эксплуатационных затрат.

Использование сверхпроводников входит в развивающуюся концепцию интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной связью (ИЭС ААС), и одной из задач, которая ставится в данной концепции, является сглаживание графика нагрузки, что позволяет повысить эффективность, надежность, качество электроснабжения. В условиях сглаженного графика нагрузки с высоким коэффициентом загрузки СПТ могут занять достойное место в ИЭС ААС.

Научно обоснованная стратегия должна обеспечивать выбор оптимального трансформаторного оборудования преобразовательных подстанций не только из выпускаемого электротехнической промышленностью в настоящее время, но и позволять осуществлять прогнозирование развития трансформаторного оборудования. Для разработки такой стратегии целесообразно применить системный подход, при котором, опираясь на признание объективного характера всеобщей связи, причинной обусловленности явлений и господства необходимости, правильного сочетания необходимости и случайности, можно нетривиально подойти к описанию построения системы электроснабжения. Применение системного анализа позволяет управлять формированием системы электроснабжения на основе учета изменений технико-экономических показателей систем электроснабжения предприятий в зависимости от различного количества и особенностей трансформаторного оборудования подстанций, разработать научно обоснованную стратегию выбора оптимального трансформаторного оборудования на основе изучения законов изменения технико-экономических показателей систем электроснабжения [83].

5.5. Эффекты от замены выключателя и кабельной линии

При выборе электрооборудования одним из важнейших параметров является стойкость к электродинамическому воздействию тока КЗ, следовательно, эф-

фekt от замены выключателя на выключатель с меньшим током отключения проявляются в аварийном режиме работы сети [86,87].

Стоимости вакуумных выключателей (ВВ) класса напряжения 10 кВ приведены в таблице 5.2 для разных номинальных токов с различными токами отключения (по состоянию на 2012 г.).

Таблица 5.2 – Стоимость ВВ классом напряжения 10 кВ [84]

I _{отк} , кА	Стоимость выключателя, руб.	
	I _н = 1000 А	I _н = 2000 А
20	132 196	157 638
31,5	172 719	201 219
40	219 200	256 300

Построим зависимость (рисунок 5.11) стоимости выключателя (класс напряжения 10 кВ) от его номинального тока отключения.

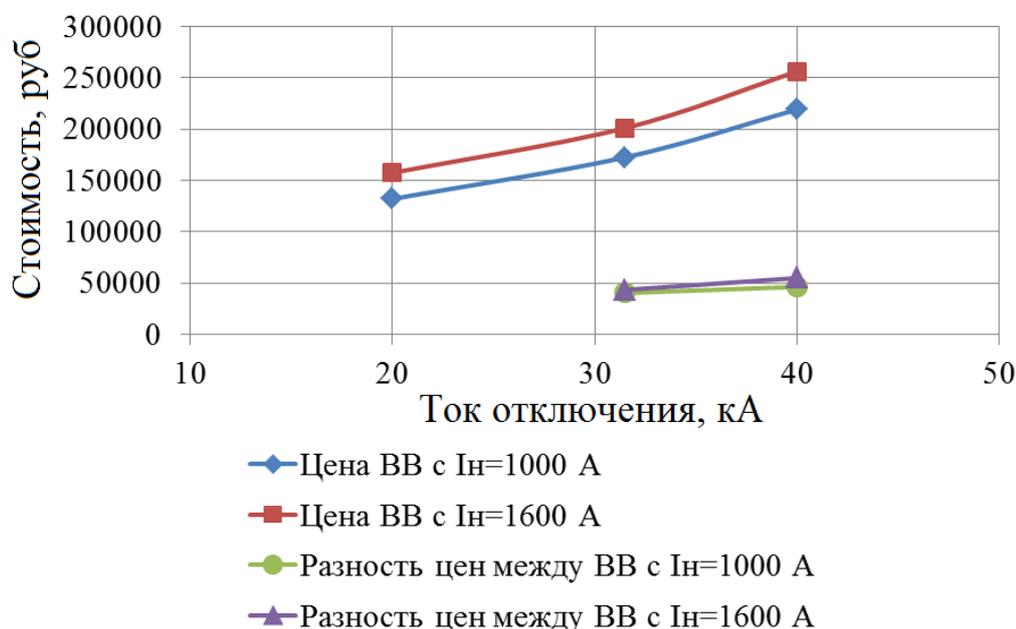


Рисунок 5.11 – Зависимость стоимости ВВ от номинального тока отключения для различных номинальных токов выключателей

Из рисунка 5.11 видно, что стоимость ВВ в большей степени зависит от номинального тока отключения ВВ, чем от его номинального тока. Следовательно,

при данной возможности выбрать к установке выключатель с меньшим номинальным током отключения, положительный экономический эффект на этапе капитальных вложений будет не столь ощутим [86,87].

С учетом того, что экономический эффект при выборе одного выключателя с меньшим номинальным током отключения в пределе достигает нескольких десятков тысяч рублей экономически целесообразная стоимость СПТ будет слишком низкой для обоснованной установки без учета прочих положительных эффектов от установки СПТ [86,87].

Эффект от замены кабельной линии (КЛ) также проявляется в аварийном режиме работы электрической сети. Замена КЛ при проектировании СЭС с экономической точки зрения наиболее актуальна для промышленных предприятий в силу большей протяженности КЛ в данных системах.

КЛ с алюминиевыми жилами применяются сечениями от 16 мм² до 240 мм² на основе анализа цен представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Цены на КЛ классом напряжения 10 кВ в зависимости от сечения жил [85]

Марка и сечение КЛ, мм ²	Цена за один метр КЛ (включая НДС), руб.	Разность в ценах одного метра КЛ (включая НДС) соседних стандартных сечений, руб.	
АСБ2л-10 3x70	525	57	–
АСБ2л-10 3x95	582		63
АСБ2л-10 3x120	645	90	115
АСБ2л-10 3x150	735		
АСБ2л-10 3x185	850	110	–
АСБ2л-10 3x240	960		

Построим зависимость отражающую стоимость одного метра КЛ от сечения токопроводящих жил.

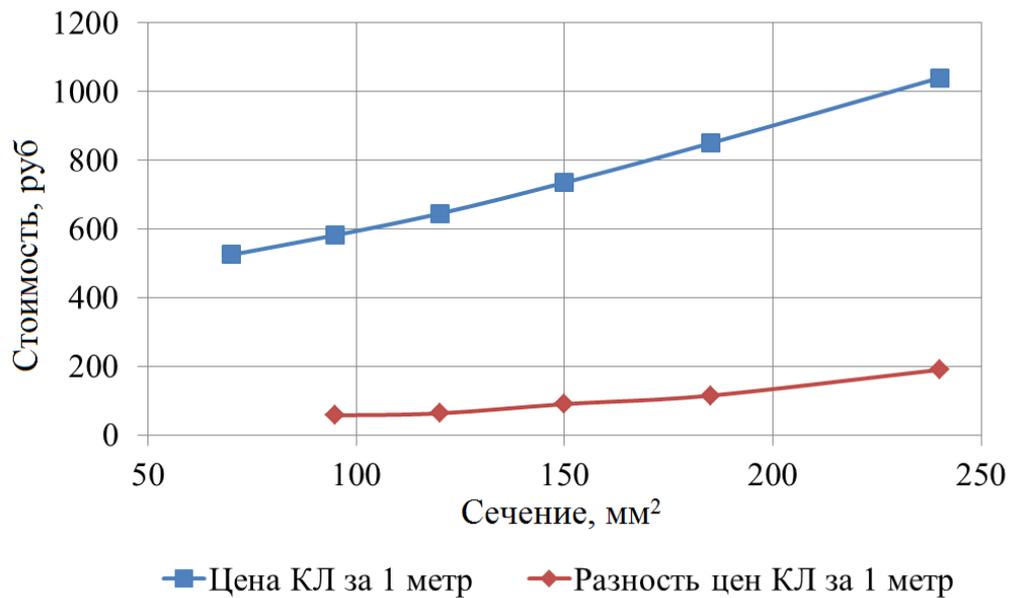


Рисунок 5.12 – Стоимость метра КЛ различных сечений и разность стоимостей КЛ соседних сечений

Из рисунка 5.12 видно, что цена кабельной линии плавно возрастает при увеличении площади поперечного сечения токоведущей жилы. При оценке эффекта от замены кабельной необходимо принимать во внимание то, что при выборе меньшего сечения КЛ имеет место обратный эффект – возрастание потерь в нормальном режиме работы электрической сети. Также необходимо отметить, что условиям обеспечения тепловой и электродинамической устойчивости как правило не удовлетворяют кабельные линии с сечениями токоведущих жил до 50 мм² включительно.

С учетом того, что экономический эффект при выборе одной КЛ с меньшим сечением токоведущих жил составляет 60 – 200 руб. за метр КЛ, можно сделать вывод о том, что экономически целесообразная стоимость СПТ будет достаточно большой только в случае выбора достаточно протяжённой КЛ (или группы КЛ) с большими сечениями, иначе, экономически целесообразная стоимость СПТ будет слишком низкой для обоснованной установки СПТ без прочих положительных эффектов от его использования [86,87].

5.6. Выводы

1. Главное преимущество сверхпроводниковых трансформаторов перед традиционными трансформаторами – низкие нагрузочные потери. Однако, из-за высокой стоимости СПТ использование его в данное время с существующим уровнем развития сверхпроводниковых технологий представляется нецелесообразным. Необходимо значительное снижение уровня цен на СП провода для широкого использования СП в трансформаторах.

2. Выполнена оценка срока окупаемости СПТ в различных условиях. Из приведенных зависимостей срока окупаемости СПТ видно, что при повышении цены на электроэнергию и одновременном снижении цены на СП провода СПТ могут составить достойную конкуренцию обычным традиционным трансформаторам. На данном этапе развития СП технологий СПТ будут интересны в специальных применениях, где требуются особые характеристики СПТ – меньшие массогабаритные показатели, отсутствие тепловыделений, пожаровзрывобезопасность.

3. Показано, что для получения максимальной выгоды от применения СПТ необходимо устанавливать их в местах с большим коэффициентом загрузки, с большой величиной T_{max} . В качестве таких мест могут выступать предприятия с двух-, трехсменным режимом работы.

4. Установка СПТ с токоограничивающей функцией позволит выбирать кабельные линии с меньшим сечением и выключатели с меньшим током отключения по сравнению со случаем установки обычного трансформатора, тем самым несколько снижая капиталовложения.

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 передаваем-

мой 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 ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лутидзе Ш.И., Джафаров Э.А.** Сверхпроводящие трансформаторы. – М: Научтехлитиздат, 2002. – 206 с.
2. **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.
3. **Шмидт В.В.** Введение в физику сверхпроводников. – М.: МЦНМО изд.2-е, испр. и доп., 2000 г. – 402 с.
4. ОАО ФСК ЕЭС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fsk-ees.ru/>. – Загл. с экрана.
5. Министерство энергетики РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://minenergo.gov.ru/aboutminen/energostategy/>. – Загл. с экрана.
6. **Вишнева В.О.** Принципы технологического маркетинга сверхпроводников как объекта nanoиндустрии / В.О. Вишнева // Цветные металлы. – 2013. – №7. – С. 15-22.
7. **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.
8. **Самойленков С.В.** Ленты на основе высокотемпературных сверхпроводников технологии и перспективы применения. Часть 1 / С.В. Самойленков, А.И. Кучаев, С.С. Иванов, А.Р. Кауль // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. – 2011. – №10. – С. 140-148.
9. **Волков Э.П.** Переходные процессы в токоограничивающем устройстве на основе ВТСП проводов второго поколения / Э.П. Волков, Л.С. Флейшман, В.А. Мальгинов, А.В. Мальгинов // Известия академии наук. Энергетика. – 2009. – №2. – С. 64-76.
10. **Елагин П.В.** Сверхпроводниковые кабели – реальные очертания будущей энергетики / П.В. Елагин // Новости электротехники [Электронный ресурс]. – 2005. – № 4 (34). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/34/14.php>.

11. **Елагин П.В.** Сверхпроводниковый токоограничитель. Коммутационный аппарат будущего / П.В. Елагин // Новости электротехники [Электронный ресурс]. –2005. –№ 3 (33). –Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/05>.

12. **Щербаков В.И.**, Сверхпроводящие ограничители тока // Информационный бюллетень «Сверхпроводники для электроэнергетики». – М: НИЦ Курчатовский институт, 2006. – т.3, №6. – С. 10-13.

13. Сверхпроводники в электроэнергетике [Электронный ресурс] // М, 2011. – Режим доступа: <http://perst.issph.kiae.ru/supercond/index.php>. – Загл. с экрана.

14. **Kotari M.** Development of 2 MVA class superconducting current limiting transformer with YBCO coated conductors // M. Kotari, H. Kojima, N. Hayakawa, F. Endo, H. Okubo // IEEE/CSC&ECAS European superconductivity news forum. –2010. – № 11.

15. **Kurupakorn C.** Development of high temperature superconducting fault current limiting transformer with Bi2212 bilk coil // C. Kurupakorn, N. Hayakawa, N. Kashima, S. Nagaya, M. Noe, K.-P. Juengst, H. Okubo // IEEE Transaction on applied superconductivity. – 2004. –vol.14, no 2. – pp. 900-903.

16. **Iwakuma M.** Development of REBCO superconducting transformer with current limiting function / M. Iwakuma, A. Tomioka, T. Otonari et.al. // IEEE Transaction on applied superconductivity. – 2011. –vol.21, no 3. – pp. 1405-1408.

17. **Berger A.** Test results of 60 kVA current limiting transformer with full recovery under load / A. Berger, M. Noe, A Kudymow // IEEE Transaction on applied superconductivity. – 2011. –vol.21, no 3. – pp. 1384-1387.

18. **Glasson N.** Development of 1 MVA 3-phase superconducting transformer using YBCO Roebel cable /N. Glasson, M. Staines, R. Buckley. M. Pannu, S. Kalsi // IEEE/CSC&ECAS European superconductivity news forum. –2011. – № 15.

19. **Лизунов С.Д.**, Лоханин А.К. Проблемы современного трансформаторостроения в России // Электричество.–2000.–№9.– С. 5-12.

20. **Чернопленков Н.А.**, Чубраева Л.И. Сорок лет сверхпроводниковому электромашиностроению // IX Симпозиум «Электротехника 2030. Перспективные технологии электроэнергетики»: Тез. докл. 29-31 мая 2007 г. – М, 2007.

21. **Глускин И.З.** Сверхпроводниковые токоограничивающие устройства и индуктивные накопители энергии для электроэнергетических систем / И.З. Глускин, Г.А. Дмитриева, М.Ш. Мисриханов, В.Г. Наровлянский, И. В. Якимец. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 373 с.

22. **Елагин П.В.** Сверхпроводниковый токоограничитель. Коммутационный аппарат будущего / П.В. Елагин // Новости электротехники [Электронный ресурс]. – 2005. – № 3 (33). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/05.php>.

23. **Щербаков В.И.**, Лобынцев В.В. Криогенное оборудование для сверхпроводниковых электротехнических устройств // Информационный бюллетень «Сверхпроводники для электроэнергетики». – М: НИЦ Курчатовский институт, 2008. – т.5, №1. – С. 7-11.

24. **Nitta T.** Some considerations on superconducting transformers from a design point of view / T. Nitta, K. Misawa, H. Nomura // IEEE Transactions on magnets. – July 1996. – vol. 32, no 4. – pp. 2381-2384.

25. **Васютинский С.Б.**, Вопросы теории и расчета трансформаторов. – Л: Энергия, 1970. – 432 с.

26. **Васильев А.А.** Электрическая часть станций и подстанций / А.А. Васильев, И.П. Крючков, Е.Ф. Наяшкова, М.Н. Околович. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

27. **Вольдек А.И.** Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

28. **Костенко М.П.**, Пиотровский Л.М., Электрические машины. В 2-х ч. Ч.1 – Машины постоянного тока. Трансформаторы. –Л. Энергия, 1972. – 544 с.

29. **Маркович И.М.** Режимы энергетических систем.– М.: Энергия, 1969. – 352 с.

30. **Carr W. J.** Ac loss from the combined action of transport current and applied field // IEEE Transactions on Magnetics. – Jan 1979. – vol. 15. – pp. 240-243.

31. **Kawabata S.** Standardization of the pickup coil method for ac loss measurement of three-component superconducting wires / S. Kawabata, H. Tsuzura, Y. Fukuda, K. Funaki, K. Osamura // *Physica C: Superconductivity*. – 2003. – vol. 392-396, no. Part 2. – pp. 1129 – 1133.
32. **Лутидзе Ш.И., Джафаров Э.А.** Потери в сверхпроводящем трансформаторе // *Приборы и системы управления*. – 1999. – №10. – С. 30-32.
33. **Berger A.** Comparison of the efficiency of superconducting and conventional transformers / A. Berger, S. Cherevatskiy, M. Noe, T. Leibfried // *Journal of Physics: Conference Series* 234 (2010).
34. **Grilli F.** Ashworth S. Measuring transport AC losses in YBCO-coated conductor coils // *Superconductor Science and Technology*. – 2007. – № 20. – pp. 794-799.
35. **Brandt E., Indenbom M.** Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field // *Physical Review B*. – 1993. – vol. 48, no. 17. – pp. 12893-12906.
36. **Magnusson N., Wolfbrandt A.,** AC losses in high-temperature superconducting tapes exposed to longitudinal magnetic fields // *Cryogenics*. – 2001.– № 41. – pp. 721-724.
37. **Namjoshi K.** Biringer P. Low-Frequency Eddy-Current Loss Estimation in Long Conductors by Using the Moment of Inertia of Cross Sections // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1988. – vol. 24 no. 5. – pp. 2181-2185.
38. **Sykulski J.K., Stoll R.L.** The design, construction and operation of high temperature superconducting transformers practical considerations // *CIGRE 2000*. – 12-203.
39. **Идельчик В.И.** Электрические системы и сети. – М.: Энергоатомиздат, 1989. –592 с.
40. **Андреев Е.Н.** Математическое и физическое моделирование процессов в сверхпроводниковых трансформаторах // Е.Н. Андреев, Н.Ю. Вандюк, Д.А. Волков, Д.А. Коротков, М.Ю. Платонова, Л.И. Чубраева // *Моделирование систем и процессов*. – 2007. – №1. – С. 25-32.
41. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов. – М.: Энергия, 1976. –544 с.

42. **ГОСТ 26522–85.** Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 19 с.

43. **Вавилов С.Б.** Особенности нагрева медной и ВТСП лент в жидком азоте при ступенчатом импульсе тока / С.Б. Вавилов, И.Ф. Волошин, Г.И. Гарасько, П.Н. Дегтяренко, И.Н. Дулькин, А.В. Калинов, Л.М. Фишер // Известия академии наук. Энергетика. – 2011. – №4. – С. 37-41.

44. **Merte H.** Clark J. A. Boiling heat transfer data for liquid nitrogen at standard and near-zero gravity // Advanced Cryogenic Engineering. – 1962. – vol. 7. – pp. 546-550.

45. **Pelegriin J.** Influence of surface layer on YBaCuO coated conductors quench processes / J. Pelegriin, E. Martinez, L.A. Angurel, R. Lahoz, D. Hazelton, P. Brownsney, J. Duval // IEEE transaction on applied superconductivity. – June 2013. – vol 23. no. 3.

46. **Ульянов С.А.** Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.

47. **Манусов В.З.,** Михеев П.А. Математическая модель электромагнитного переходного процесса в электрической сети, содержащей сверхпроводниковый токоограничитель индуктивного типа // Электротехника. – 2008. – №7. – с. 50-56.

48. **Kojima H.** Self-recovery characteristic of high-T_c superconducting fault current limiting transformer with 2G coated conductors / H. Kojima, S. Ito, N. Hayakawa, F. Endo, M. Noe, H. Okubo // 8th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2007), Journal of Physics: Conference Series 97 (2008) 012154.

49. **Александров Г.Н.** Режимы работы трансформаторов.– СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 143 с.

50. SuperPower Inc. [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://superpower-inc.com/>.– Загл. с экрана.

51. AMSC [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www.amsc.com/>.– Загл. с экрана.

52. **Kalsi S.S.** Applications of high temperature superconductors to electric power equipment. – John Wiley & Sons Inc. – New Jersey, 2011. – 312 p.

53. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях / Составитель и научный руководитель А.И. Лурье // М.: Знак, 2005. – 520 с.

54. **Ishigohka T.** Experimental study on effect of in-rush current of superconducting transformer / T. Ishigohka, K. Uno, S. Nishimiya // IEEE transaction on applied superconductivity. – June 2006. – vol. 16, no. 2. – pp. 1473-1476.

55. **Nishimiya S.** Quench characteristic of superconducting transformer by inrush current / S. Nishimiya, T. Ishigohka, A. Ninomiya, K. Arai // IEEE transaction on applied superconductivity.– June 2007.–vol. 17, no. 2.– pp.1931 – 1934.

56. **Wojtasiewicz G.** Inrush current of superconducting transformer / G. Wojtasiewicz, G. Komarzyniec, T. Janowski // IEEE transaction on applied superconductivity. – June 2013. – vol. 23, no. 3.

57. **Неклепаев Б.Н.** Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

58. **Sissimatos E., Oswald B.R.** High-temperature superconducting power transformers with fault current limiting properties // Physica C. – 2002. – vol 372-376. – pp. 1698-1701.

59. **Манусов В.З.** Александров Н.В. Эффективность применения высокотемпературных сверхпроводящих трансформаторов в электроэнергетических системах // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012 г. – Вып. 1. – с. 358-361.

60. **Weber C. S.** Design and Operational Testing of a 5/10-MVA HTS Utility Power Transformer / C. S. Weber, C. T. Reis, D. W. Hazelton // IEEE Transaction on applied superconductivity. – June 2005. – vol 15, no 2. – pp. 2210-2213.

61. **Манусов В. З., Михеев П. А.** Влияние сверхпроводниковых токоограничителей на электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах // Научный вестник НГТУ. – 2007. – № 4 (29). – С. 143–156.

62. **Жданов П.С.** Вопросы устойчивости электрических систем / Под ред. Л.А. Жукова. – М., Энергия, 1979. – 456 с., ил.
63. **Калентионюк Е.В.** Устойчивость электроэнергетических систем. – Минск: Техноперспектива, 2008.–375 с.
64. **Куликов Ю.А.** Переходные процессы в электрических системах.– Новосибирск: Издательство НГТУ, 2002.–283 с.
65. **Хрущев В.Ю.** и др. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах / В.Ю. Хрущев, К.И. Заповодников, А.Ю. Юшков.– Томск: Издательство ТПУ, 2010.– 168 с.
66. **Манусов В.З.,** Александров Н.В. Влияние сверхпроводящих трансформаторов на устойчивость электроэнергетической системы // Научный вестник НГТУ. – 2013. – №3. – С. 160-165.
67. **Веников В.А.** Переходные процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1978. – 415 с.
68. **ГОСТ Р 52719-2007.** Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – М.: Стандартиформ, 2007. – 45 с.
69. **Staines M.** The development of a Roebel cable based 1 MVA HTS transformer / M. Staines N. Glasson, M. Pannu, P. K. Thakur, R. Badcock, N. Allpress, P.D'Souza¹, E. Talantsev // Superconductor Science and Technology. – January 2012. – vol 25, no 1. – pp. 1-7.
70. **Tomioka A.** The short-circuit test results of 6.9 kV/2.3 kV 400 kVA-class YBCO model transformer with fault current limiting function / A. Tomioka, T. Bohno, S. Kakami, M. Isozaki, K. Watanabe, K. Toyama, S. Sugiyama, M. Konno, Y. Goshō, H. Okamoto, H. Hayashi, T. Tsutsumi, M. Iwakuma, T. Saito, K. Tanabe, Y. Shiohara // Physica C.– January 2013. – vol. 484, pp. 239-241.
71. **Селиванов В.Н.** Использование программы расчета электромагнитных переходных процессов АТР-ЕМТР в учебном процессе // Вестник МГТУ, 2009. – том. 12, №1. – С. 107-112.
72. **РД.34.20.578-79.** Методические указания по определению устойчивости энергосистем. Часть II. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 91 с.

73. **Меньшов Б.Г.** и др, Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности / Б.Г. Меньшов, М.С. Ершов, А.Д. Яризов . –М.: Недра, 2000.– 437с.

74. **Правила устройства электроустановок.** 7-е изд. М.: НЦ ЭНАС, 2006 г. – 552 с.

75. **Dirks J.A.** High-temperature superconducting transformers performance, cost and market evaluation / J.A. Dirks, J.E. Dagle, G. John // Pacific Northwest Laboratory.– 1993.– 210 p.

76. **Сальников В.Г.** Экономия электроэнергии в промышленности. – Алма-Ата: Казахстан, 1984.– 124 с.

77. **Лыкин А.В.** Электрические системы и сети: Учеб. пособие. – М.: Логос, 2006. – 254 с.

78. **Reddy B.D.** Techno-commercial aspects of superconducting transformers – a case study / B.D. Reddy, K.D. Kumar, R. Sudha // International journal of emerging science and engineering. – March 2013. – vol. 1, issue 5. – pp. 62-65.

79. **Файбисович Д.Л.** Справочник по проектированию электрических сетей. – М.: ЭНАС, 2009. – 392 с.

80. Siemens global website [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.siemens.com/>. – Загл. с экрана.

81. **Желтов В.В.** Перспективы использования высокотемпературных сверхпроводников / В.В. Желтов, С.С. Иванов, А.В. Кацай, Д.А. Комарков // Энергия: экономика, техника, экология. – 2011. – №6. – С. 11-22.

82. **Наровлянский В.Г.** Современные методы и средства предотвращения асинхронного режима электроэнергетической системы. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 360 с.

83. **Сальников В.Г., Шевченко В.В.** Эффективные системы электроснабжения предприятий цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1986. – 320 с.

84. Прайс-лист на вакуумные выключатели компании ООО «БЭСТЭР» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bester54.ru>. – Загл. с экрана.

85. Прайс-лист на кабельно-проводниковую продукцию компании ООО «Мицар» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mitsar.ru/>. – Загл. с экрана.

86. **Манусов В. З.**, Михеев П. А., Оценка экономически целесообразной стоимости сверхпроводникового ограничителя токов // «Наука. Технологии. Инновации» 6-9 дек. 2007 г.: Тез. докл. всеросс. науч. конф. – Новосибирск, 2007. – С. 240-242.

87. **Манусов В. З.**, Михеев П. А. Обоснование экономической эффективности сверхпроводниковых токоограничителей в условиях оптового рынка // «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования» 12-14 мая 2008 г: Тез. докл. всеросс. науч. конф. – Томск, 2012. – С. 39-40.

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АРВ	Автоматический регулятор возбуждения
АПВ	Автоматической повторное включение
ВЛ	Воздушная линия
ВТСП	Высокотемпературный сверхпроводник
ВН	Высокое напряжение
ГПП	Главная понизительная подстанция
ЗМН	Защита минимального напряжения
КЗ	Короткое замыкание
КЛ	Кабельная линия
КНЭ	Кратковременное нарушение электроснабжения
НТСП	Низкотемпературный сверхпроводник
НН	Низкое напряжение
ПВК	Программно-вычислительный комплекс
РЗ	Релейная защита
СГ	Синхронный генератор
СН	Собственные нужды
СОТ	Сверхпроводниковый ограничитель токов
СП	Сверхпроводящий
СПТ	Сверхпроводниковый трансформатор
СПИН	Сверхпроводниковый индуктивный накопитель
СЭС	Система электроснабжения
ТОУ	Токоограничивающее устройство
ШБМ	Шины бесконечной мощности
ЭДС	Электродвижущая сила
ЭЭС	Электроэнергетическая система

Программный код для расчетов процессов перехода ВТСП провода в нормальное состояние и последующего возврата в сверхпроводящее состояние

Main.m

```

clc
clear all
close all
%-----
Dlina = 100; % длина провода, м
Shirina = 0.012; % ширина провода, м
%-----параметры материалов-----
%параметры ВТСП слоя-----
UCritical = 0.0001; % критическое напряжение, В/м
Uc = UCritical*Dlina; % напряжение на проводе, В
Ic_pri_77 = 100; % критический ток, А
Tolshina_VTSP = 0.000001; % толщина ВТСП слоя
Ploshad_VTSP = Tolshina_VTSP*Shirina; % площадь поперечного сечения
N % коэффициент N
%параметры подложки-----
Tolshina_Sub = 0.05e-3; % толщина слоя подложки
Ploshad_Sub = Tolshina_Sub*Shirina; % площадь поперечного сечения
%параметры медного слоя-----
Tolshina_Cu = 0.02e-3; % толщина медного слоя
Ploshad_Cu = Tolshina_Cu*Shirina; % площадь поперечного сечения
%параметры слоя серебра-----
Tolshina_Ag = 0.002e-3; % толщина серебряного слоя
Ploshad_Ag = Tolshina_Ag*Shirina; % площадь поперечного сечения
%площадь поверхности охлаждения-----
Ploshad_pooverhnosti = Shirina*Dlina;
T_LN2 = 77; % температура жидкого азота
%-----задание нач.усл. переменных-----
Nucleate_Peak = 88.8;
DelTransTemp = 100000000;
Npar=24;
counter = 0;
Inew = 0;
error = 1;
k = 1;
Temperature_Counter(k) = 0;
Place(k) = 0;
Ta = T_LN2;
R_Cu(k) = 0;
Rs(k) = 0;
Rm(k) = 0;
Is(k) = 0;
Im(k) = 0;
Temperature(k) = T_LN2;
QsM(k) = 0;
QsVTSP(k) = 0;
QsAll(k) = QsM(k)+ QsVTSP(k);
DeltaT(k) = 0;
Del_T(k) = 0;
Qotved(k) = 0;
Qost(k) = QsAll(k) - Qotved(k);
Um = 0;
Us = 0;
Temp_Counter = 0;
k = k+1;
%-----
Time_of_process % расчет времени
%-----решение уравнения теплопроводности-----
while k<=size(time,1)
    Ta = Temperature(k-1);
    Del_T(k) = (Ta-T_LN2);
    %-----
    if k == 1
        Current = Supplied_Current( 0,1,time1,time2,time3,time4);

```

```

else
    if Ta<=92, Current = Supplied_Current( 0,1,time1,time2,time3,time4);
    else Current = Supplied_Current(
1000000000,Rm,time1,time2,time3,time4);
    end
end
%-----
if Ta<92
    RSub = Sub_Res(Ta)*Dlina/Ploshad_Sub;
    RAg = Ag_Res(Ta)*Dlina/Ploshad_Ag;
    RCu = Cu_Res(Ta)*Dlina/Ploshad_Cu;
    Rm = ((RSub*RAg*RCu)/((RSub*RAg)+(RSub*RCu)+(RCu*RAg)));
    Ic(k) = (Ic_pri_77/-0.1848)*log(Ta/93);
    while abs(error)>=0.0001
        A = Uc/(Rm*Ic(k)^n);
        B = Inew^n;
        C = Inew;
        D = (A*B)+C;
        error = Current(k)-D;
        Inew = Inew+(error/10001);
        if Inew>0
            Um = (Current(k)-Inew)*Rm;
            if Um<0
                Um = 0;
            end
            Rs = Um/Inew;
        else
            Inew = 0;
            Um = Current(k)*Rm;
            Rs = 100000000;
        end
    end
    Is(k) = Inew;
    Im(k) = Current(k)-Is(k);
    if Im(k)<0
        Im(k) = 0;
        Is(k) = Current(k);
    end
    QsM(k) = Im(k)*Im(k)*Rm*Delta_Time;
    QsVTSP(k) = Is(k)*Is(k)*Rs*Delta_Time;
    QsAll(k) = QsM(k)+QsVTSP(k);
%-----
cooling % ВЫЗОВ cooling
%-----
Qost(k) = Qost(k-1)+QsAll(k)-Qotved(k);
if Qost(k)<0
    Qost(k) = 0;
end
Cp_Sub(k) = Sub_Cp(Ta)*(Dlina*Shirina*Tolshina_Sub);
Cp_Cu(k) = Cu_Cp(Ta)*(Dlina*Shirina*Tolshina_Cu);
Cp_Ag(k) = Ag_Cp(Ta)*(Dlina*Shirina*Tolshina_Ag);
Specific_Heat_VTSP(k) = YBCO_Cp(Ta)*(Dlina*Shirina*Tolshina_VTSP)*6380;
DeltaT(k) = Qost(k)/(Cp_Sub(k)+Specific_Heat_VTSP(k)+Cp_Ag(k)+Cp_Cu(k));
Ta = DeltaT(k)+T_LN2;
Is(k) = Inew;
Us = Is(k)*Rs;
Voltage_VTSP(k) = Us;
error = 1;
Temperature(k) = Ta;
R_M(k) = Rm;
VoltageM(k) = Im(k)*R_M(k);
R_VTSP(k) = Rs;
Rtrans(k)=R_VTSP(k)*R_M(k)/(R_VTSP(k)+R_M(k))/Npar;
%Taper(k) =(Xtrans+Xc)/(314*((R_HTS*R_M/(R_HTS+R_M))+Rc));

```

```

    k = k+1;
else
    R_Sub(k) = Sub_Res(Ta)*Dlina/Ploshad_Sub;
    R_Cu(k) = Cu_Res(Ta)*Dlina/Ploshad_Cu;
    R_Ag(k) = Ag_Res(Ta)*Dlina/Ploshad_Ag;
    Rm =
(R_Sub(k)*R_Ag(k)*R_Cu(k))/(R_Sub(k)*R_Ag(k)+R_Sub(k)*R_Cu(k)+R_Cu(k)*R_Ag(k));
    Ic(k) = 0;
    Is(k) = 0;
    Im(k) = Current(k)-Is(k);
    QsM(k) = Im(k)*Im(k)*Rm*Delta_Time;
    QsVTSP(k) = Is(k)*Is(k)*Rs*Delta_Time;
    QsAll(k) = QsM(k)+QsVTSP(k);
%-----
    cooling % ВЫЗОВ cooling
%-----
    Qost(k) = Qost(k-1)+QsAll(k)-Qotved(k);
    if Qost(k)<0
        Qost(k) = 0;
    end
    Cp_Sub(k) = Sub_Cp(Ta)*(Dlina*Shirina*Tolshina_Sub);
    Cp_Cu(k) = Cu_Cp(Ta)*(Dlina*Shirina*Tolshina_Cu);
    Cp_Ag(k) = Ag_Cp(Ta)*(Dlina*Shirina*Tolshina_Ag);
    Specific_Heat_VTSP(k) = YBCO_Cp(Ta)*(Dlina*Shirina*Tolshina_VTSP)*6380;
    DeltaT(k) = Qost(k)/(Cp_Sub(k)+Specific_Heat_VTSP(k)+Cp_Ag(k)+Cp_Cu(k));
    Ta = DeltaT(k)+T_LN2;
    error = 1;
    Temperature(k) = Ta;
    R_M(k) = Rm;
    Voltage_M(k) = Im(k)*R_M(k);
    Voltage_VTSP(k) = Voltage_M(k);
    R_VTSP(k) = 1000000000;
    Rtrans(k)=R_VTSP(k)*R_M(k)/(R_VTSP(k)+R_M(k))/Npar;
    %Taper(k) =(Xtrans+Xc)/(314*((R_HTS*R_M/(R_HTS+R_M))+Rc))
    k = k+1;
end
end
end

```

Supplied current.m

```

function [Tok, Rprovoda] = Supplied_Current( R_VTSP, R_M, time1, time2, time3,
time4 )
%задание параметров трансформатора-----
Ukp=5; Unom = 115; %kV
Xtrans = Ukp/100*Unom^2/40;
Xsist=10; Rsist=1;
a=0.2;
b=0.4;
Rline=a*3*20.76; Xline=a*3*9.07;
Rnagr=120; Xnagr=260;
Rprovoda = R_VTSP*R_M/(R_VTSP+R_M);
I_Fault =
sqrt(2/3)*Unom*1000/sqrt(((R_VTSP*R_M/(R_VTSP+R_M))/4+Rsist+Rline)^2+(Xtrans+Xsist
+Xline)^2)/4;
I_Vozvrat= sqrt(2)*50;
%задание ТОКОВ-----
w = 100*pi; Taper =0.01;
I1 = 50*sqrt(2)*sin(w*time1);
I2_per = I_Fault*sin(w*time2);
I2_aper = -(I1(end)-I2_per(1))*exp(-(time2-
time1(end))/(Xtrans+Xsist+Xline)/(w*(R_VTSP*R_M/(R_VTSP+R_M)/4+Rsist+Rline)));
I2 = I2_per + I2_aper;
I3 = I_Vozvrat*sin(w*time3);%0*time3;
I4 = I_Vozvrat*sin(w*time4);

```

```

Total_I = [I1 I2 I3 I4];
plot(Total_I);
%определение действующего значения-----
RMS_I = zeros(1,length(Total_I));
%if 1 > 2
    Buf = zeros(1,20);
    for i=1:length(Total_I)
        for j=20:-1:2,
            Buf(j) = Buf(j-1);
        end
        Buf(1) = Total_I(i)^2;
        RMS_I(i) = sqrt( sum(Buf)/20 );
    end
%else
    %RMS_I1 = 50/sqrt(2)*ones(1,length(I1));
    %RMS_I2 = I_Fault/sqrt(2)*ones(1,length(I2))+abs(I2_aper);
    %RMS_I4 = 50/sqrt(2)*ones(1,length(I4));
    %RMS_I = [RMS_I1 RMS_I2 I3 RMS_I4];
%end
Tok=RMS_I';

```

Cooling.m

```

if Del_T(k)<3.1483038348
    q=4390
    Place(k) = 1;
end
if Del_T(k)>=3.1483038348 && Del_T(k)<13.0781710914
    q=13560*Del_T(k)-38301
    Place(k)=2;
end
if Del_T(k)>=13.0781710914 && Del_T(k)<19.1421812546
    q=139039
    Place(k) = 3;
end
if Del_T(k)>=19.1421812546 && Del_T(k)<29.9367066323
    q=-12259*Del_T(k)+373703
    Place(k) = 4;
end
if Del_T(k)>=29.9367066323
    q=95.375*Del_T(k)+3853.7
    Place(k) = 5;
end

Qotved(k)=q*(Length*Width)*Delta_Time;

```

Time of process.m

```

%задание интервалов времени-----
Norm1_time = 0.1;
Fault_time = 0.1;
Off_time = 0.3;
Norm2_time = 3;
%шаг времени-----
Delta_Time = 0.001;
%-----
time1 = 0:Delta_Time:Norm1_time;
time2 = (time1(end)+Delta_Time):Delta_Time:time1(end)+Fault_time;
time3 = (time2(end)+Delta_Time):Delta_Time:time2(end)+Off_time;
time4 = (time3(end)+Delta_Time):Delta_Time:time3(end)+Norm2_time;
%задание матрицы времени-----
time_1=[time1 time2 time3 time4];

```

```
time=time_1';
```

N Valie.m

```
E_One=0.5;
E_Two=5.0;
I_One=93;
I_Two=100;
gggg=log(E_Two/E_One);
hhhh=log(I_Two/I_One);
n=gggg/hhhh;
```

Ag Cp.m

```
function [Ag_Cp_Out] = Ag_Cp(T)
RhoAg = 10500;
Ag_Cp_Out = (571302.22046*(T^(0.00011))-571442.51725)*RhoAg;
```

Ag Res.m

```
function [Ag_Res_Out] = Ag_Res(T)
if T>=293
    a = ((0.0685*T)-3.77476)*10^-9;
else
    a = ((-1.0796*10^(-06)*T^3)+(0.00046*T^2)+0.01555*T-0.38874)*1*10^(-9);
end
Ag_Res_Out = a;
```

Cu Cp.m

```
function [Cu_Cp_Out]= Cu_Cp(T)
Rho_Cu=9020.665-0.30358*T;
if T<=200
a=(368.53324*(1-exp(-0.02322*T))^3.65205)*Rho_Cu;
else
a=((2.3181*10^-07*T^3)-(0.00052*T^2)+(0.44648*T)+287.47602)*Rho_Cu;
end
Cu_Cp_Out=a;
```

Cu Res.m

```
function [Cu_Res_Out] = Cu_Res(T)
if T<=190
a=((-1.1787*10^(-06)*T^3)+(0.00067*T^2)-0.02399*T+0.3855)*10^(-9);
else
a=(-118.11359+(34.4038*(exp((T+2715.04572)/2191.4633))))+.52)*10^(-9);
end
Cu_Res_Out=a;
```

Sub Cp.m

```
function [Sub_Cp_Out]=Sub_Cp(T)
Rho_Sub=8890;
if T<=300
b=15503.108-(37280.377*log10(T))+(26788.417*log10(T)^2)+(7010.0877*log10(T)^3)-
(22731.651*log10(T)^4)+(15386.526*log10(T)^5)-
(5175.7968*log10(T)^6)+(896.97274*log10(T)^7)-(64.055866*log10(T)^8);
a=(10^b)*Rho_Sub;
else
a=((0.1581*T)+410.24)*Rho_Sub;
end
Sub_Cp_Out=a;
```

Sub Res.m

```
function [Sub_Res_Out] = Sub_Res(T)
a=1.30*0.000001;
Sub_Res_Out=a;
```

YBCO Cp.m

```
function [YBCO_Cp_Output] = YBCO_Cp(T)
if T<=80.5
    Cybco=1.2173*T+91.659;
else
    if T<=84
        Cybco=-19.423*T+1752.4;
    else
        if T<=90
            Cybco=5.0661*T-304.24;
        else
            if T<=92
                Cybco=-3.9285*T+504.7;
            else
                if T<=200
                    Cybco=(-456.60151*exp(-T/65.99887))+260.40759;
                else
                    if T<=300
                        Cybco=(-0.0183*T^2)+(11.254*T)-1281.1;
                    else
                        if T<=500
                            Cybco=(334.68-(0.28854*T)+((5.7220*10^(-
4)))*T^2))*(1/0.668);
                        else
                            if T<=900
                                Cybco=(316.92-(0.10258*T)+((1.9478*10^(-
4)))*T^2))*(1/0.665);
                            else
                                Cybco=(316.92-(0.10258*T)+((1.9478*10^(-
4)))*T^2))*(1/0.665);
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
YBCO_Cp_Output=Cybco;
```

YBCO Ic.m

```
function [YBCO_Ic_Out] = YBCO_Ic(T,Critical_Current_at_77,T_LN2)
a = Critical_Current_at_77*(93-T)/(93-T_LN2);
if a<0
a=0;
end
YBCO_Ic_Out=a;
```

Акты внедрения и патенты

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 132250

СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ ОБМОТКА ТРАНСФОРМАТОРА

Патентообладатель(и): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Новосибирский государственный технический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013110092

Приоритет полезной модели 06 марта 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 10 сентября 2013 г.

Срок действия патента истекает 06 марта 2023 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Б.П. Симонов

