

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи



Кривецкий Игорь Владимирович

**Разработка рациональных способов секционирования сверхпроводящих  
токоограничивающих устройств.**

Специальность 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты» -  
(технические науки)

Диссертация на соискание научной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,

с.н.с.

Копылов С.И.

Москва, 2014 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

Используемые сокращения.....	4
Введение.....	5
<b>1 Аналитический обзор сверхпроводящих токоограничивающих устройств.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Ограничители токов короткого замыкания.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Особенности конструкции сверхпроводящих токоограничивающих устройств.....</b>	<b>19</b>
1.2.1 <u>Резистивные токоограничители</u> .....	20
1.2.2 <u>Индуктивные токоограничители</u> .....	23
1.2.3 <u>Короткая сверхпроводящая кабельная линия постоянного тока</u> .....	26
<b>1.3 Секционирование сверхпроводящих устройств.....</b>	<b>30</b>
<b>1.4 Цель работы. Постановка задачи исследования.....</b>	<b>34</b>
<b>2 Сверхпроводящие токоограничители резистивного типа.....</b>	<b>36</b>
<b>2.1 Влияние секционирования на характеристики сверхпроводящего резистивного токоограничителя.....</b>	<b>38</b>
<b>2.2 Методика расчета гистерезисных потерь.....</b>	<b>44</b>
<b>2.3 Расчет гистерезисных потерь в секционированном токоограничителе.....</b>	<b>50</b>
<b>2.4 Результаты расчетов.....</b>	<b>53</b>
<b>Выводы по главе 2.....</b>	<b>54</b>
<b>3 Сверхпроводящие токоограничители индуктивного типа.....</b>	<b>56</b>
<b>3.1 Секционирование сверхпроводящих токоограничивающих устройств трансформаторного типа.....</b>	<b>57</b>
<b>3.2 Сравнение токоограничителей трансформаторного и автотрансформаторного типа.....</b>	<b>60</b>

3.2.1 <u>Виды быстродействующих выключателей</u> .....	60
3.2.2 <u>Методика расчета токоограничителей трансформаторного типа</u> ...	63
3.2.3 <u>Методика расчета токоограничителей автотрансформаторного типа</u> .....	67
3.2.4 <u>Особенности программной реализации расчёта характеристик токоограничителей</u> .....	69
3.2.5 <u>Результаты расчетов</u> .....	71
3.2.6 <u>Оценка условий охлаждения обмоток</u> .....	81
3.2.7 <u>Оценка электродинамических усилий</u> .....	83
<b>3.3 Перспективы использования сверхпроводящих обмоток в токоограничивающих устройствах</b> .....	<b>85</b>
3.3.1 <u>Расчет потерь в сверхпроводящей обмотке токоограничителя трансформаторного типа</u> .....	88
<b>Выводы по главе 3</b> .....	<b>103</b>
<b>4 Короткие сверхпроводящие кабельные линии постоянного тока</b> .....	<b>105</b>
4.1 <b>Токонесущая способность сверхпроводящего униполярного кабеля</b> .....	<b>106</b>
4.2 <b>Токонесущая способность сверхпроводящей кабельной линии</b> ...	<b>108</b>
4.3 <b>Методика расчета секционированного сверхпроводящего кабеля</b> .....	<b>110</b>
4.4 <b>Результаты расчетов</b> .....	<b>111</b>
4.5 <b>Методика расчета гистерезисных потерь</b> .....	<b>115</b>
4.6 <b>Расчет гистерезисных потерь в секционированном ВТСП кабеле</b> .....	<b>116</b>
4.7 <b>Результаты расчетов</b> .....	<b>119</b>
<b>Выводы по главе 4</b> .....	<b>120</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>122</b>
<b>Список литературы</b> .....	<b>125</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> .....	<b>136</b>

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

**АПВ** – аппарат повторного включения;

**БВ** – быстродействующий выключатель;

**ВТСП** – высокотемпературный сверхпроводящий;

**КЗ** – короткое замыкание;

**КЛ** – кабельная линия;

**РУ** – распределительное устройство;

**СОТ** – сверхпроводящий ограничитель тока;

**СП** – сверхпроводник;

**СУ** – система управления;

**ТУ** – токоограничивающее устройство;

**ХХ** – холостой ход;

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие электроэнергетических систем тесно связано с общим экономическим развитием и характеризуется устойчивым ростом электрических нагрузок, соответствующим увеличением генерирующих мощностей, усилением связей с соседними электроэнергетическими системами и созданием крупных объединённых систем. Неизбежным следствием такого развития является рост токов короткого замыкания (КЗ), особенно остро проявляющийся в регионах с высокой плотностью энергопотребления, а также в мегаполисах.

Увеличение токов КЗ сопровождается увеличением электродинамических и тепловых воздействий на оборудование, приводит к росту количества повреждений обмоток генераторов, синхронных компенсаторов, трансформаторов, реакторов и других электрических аппаратов. Сверхнормативные токи КЗ могут повреждать выключатели, обеспечивающие локализацию и ликвидацию аварийных ситуаций в системе, что приводит к увеличению масштабов последствий КЗ. *Указанные обстоятельства снижают надёжность работы электрических систем.*

Максимальный уровень токов КЗ, определяющий требования к электрическим аппаратам и оборудованию, становится критическим параметром и ограничивающим фактором развития электрических систем. Величина максимального уровня токов КЗ – это технико-экономический параметр, определяющий целесообразность ограничения тока КЗ или замену оборудования на новое (если это возможно), способное выдержать более высокие значения токов КЗ. Учитывая, что второй путь является высокочувствительным, основные методы решения проблем связаны с применением способов и мероприятий по ограничению уровней токов КЗ.

*В настоящее время в сетях промышленных предприятий, электростанций и подстанций напряжением до 35 кВ ограничение токов КЗ достигается, в основном, за счет применения токоограничивающих реакторов и трансформаторов с расщеплёнными обмотками. В сетях*

*напряжением выше 35 кВ основными способами ограничения токов КЗ являются схемно-технические решения, обеспечивающие секционирование сети и организация автоматического деления сети при аварийных ситуациях. Однако все эти решения приводят к снижению надежности электроснабжения потребителей, увеличению потерь в системе, снижению качества напряжения, так как ограничение токов КЗ достигается за счет увеличения суммарного реактанса сети.*

Проблема ограничения токов КЗ является весьма актуальной. Решением этой проблемы занимаются практически все крупные электротехнические компании, международные научные организации, научно-исследовательские центры и вузы во многих странах, в том числе и в России. Особенно остро проблема проявляется в сетях напряжением 110-220 кВ. Об актуальности проблемы заявляли представители ФСК ЕЭС, Мосэнерго и других организаций. В России исследования в области сверхпроводящих токоограничивающих устройств для электроэнергетических систем были начаты более двадцати лет назад. У истоков этого направления стояли В.А. Альтов, В.С. Высоцкий, В.Б. Зенкевич, В.Е. Кейлин, Л.К. Ковалёв, Л.В. Лейтес, Н.Л. Новиков, Г.Г. Свалов, В.Е. Сытников, Л.М. Фишер, Н.А. Черноплёков, Л.И. Чубраева, Ю.Г. Шакарян, И.В. Якимец и др.

Появление новых технологий и материалов, связанных с преобразовательной техникой и явлением сверхпроводимости, быстрый прогресс в элементной базе силовой электроники и высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалах дают возможность создания токоограничивающих устройств нового поколения, обладающих свойствами, которые позволяют открыть дорогу к широкому применению этих устройств в электроэнергетике.

Следует заметить, что при реализации любой схемы сверхпроводящего токоограничителя его стоимость определяется, в основном, необходимым количеством ВТСП материала, стоимость которого достигает ~70% общей стоимости устройства. В связи с этим важное значение при разработке

сверхпроводящего токоограничителя приобретают вопросы выбора рациональной геометрии, обеспечивающей наименьший удельный расход сверхпроводника. При этом необходимо учитывать зависимость критической плотности тока в сверхпроводнике от индукции магнитного поля. Уменьшить расход сверхпроводника позволяет повышение плотности тока в тех секциях, где наибольшая индукция магнитного поля относительно невелика, и снижение плотности тока в секциях с высокой максимальной магнитной индукцией.

Под секционированием сверхпроводящего устройства, являющегося частью токоограничителя, подразумевается разбиение его на несколько частей (кабеля, кольца, обмотки или магнитной системы), отделённых друг от друга зазорами, имеющих взаимно встречное включение, связанных общим магнитным полем.

**Цель работы.** Разработка рациональных способов секционирования сверхпроводящего устройства (кабеля, кольца, обмотки, магнитной системы) токоограничителя для повышения эффективности использования сверхпроводящих материалов.

В этой связи необходимо исследовать влияние способа секционирования и соотношений геометрических размеров сверхпроводящего устройства на пропускную способность (плотность тока) токоограничителя и потери в сверхпроводнике (гистерезисные) при нормальном режиме работы энергосистемы.

**Объект исследования.** 1. Сверхпроводящие ограничители токов различных конструкций (индуктивного типа, резистивного типа, короткие вставки постоянного тока).

2. Секционирование обмоток сверхпроводящих ограничителей токов и методики их расчетов.

**Методы исследований.** При решении задач диссертации использовались различные методы расчетов линейных и нелинейных дифференциальных уравнений и результаты их решений, элементы теории

нелинейных магнитных цепей, теория поля и электрических цепей, а также компьютерное моделирование переходных процессов.

**Научная новизна.** Предложен способ секционирования сверхпроводящих устройств токоограничителей, позволяющий учитывать токнесущие свойства сверхпроводящего материала, что, в свою очередь, даёт возможность повысить эффективность его использования. С одной стороны можно уменьшить габаритные размеры (то есть снизить необходимое количество сверхпроводящего материала) при заданном уровне тока, а с другой – увеличить плотность тока при заданных габаритных размерах.

Кроме того установлено снижение потерь при секционировании сверхпроводящих устройств токоограничителей в нормальном режиме работы сети.

Предложены новые способы секционирования сверхпроводящих устройств, на которые получены патенты.

Разработаны методики выбора размеров секций токоограничителя и расчётов гистерезисных потерь при нормальном режиме работы сети.

**Практическая ценность и реализация результатов.** Разработанные общие научные принципы проектирования сверхпроводящих секционированных устройств позволили, с одной стороны – создавать высокоэффективные образцы токоограничителей, а с другой – наметить пути дальнейшего практического использования сверхпроводящих материалов в таких устройствах, как кабели постоянного тока. Результаты теоретических исследований нашли своё применение в гранте РФФИ 11-08-00313 «Расчет тепловых потерь и других электротехнических характеристик в ВТСП лентах и в сверхпроводящих кабелях на их основе», гранте РФФИ 12-08-00412-а «Математическое моделирование тепловых и электрофизических процессов ВТСП кабелей сложной конструкции», а также используются в НИУ МЭИ в учебном процессе.

**Достоверность** разработанных методик расчетов и полученных результатов диссертации обусловлена использованием строгих математических расчетов электромагнитных полей, и подтверждается достаточной апробацией и публикациями полученных результатов.

**Апробация работы:** Основные материалы диссертации докладывались на III Международной научно-практической конференции «Применение инновационных технологий в научных исследованиях», Курск, 2011 г.; на 1-й Национальной конференции по прикладной сверхпроводимости НКПС-2011, Москва, 2011 г.; на международной конференции по сверхпроводимости Applied superconductivity ASC-2012, Oregon, 2012 г.; на международной конференции по сверхпроводимости EUCAS-2013, Genova, 2013 г.; на 2-й национальной конференции по прикладной сверхпроводимости НКПС-2013, Москва, 2013 г.; на международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых «Инженерные решения по энергетике, водоочистке и механизации процессов сельскохозяйственного производства, Москва, 12 апреля 2013 г.

**Публикации:** По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, из них две – в журналах, входящих в перечень ВАК, две в зарубежных цитируемых изданиях, а так же четыре патента на полезные модели.

**Личный вклад автора.** Разработка математической модели расчета геометрии секционированного кабеля и секционированного токоограничителя, разработка методики расчета гистерезисных потерь. Написание программы для расчета геометрии секционированных систем, написание программы для расчета гистерезисных потерь в секционированных системах. Выполнение всех приведенных расчетов секционированных токоограничивающих устройств и гистерезисных потерь в них, анализ полученных результатов.

**На защиту выносятся:**

- рациональные способы секционирования и схемы соединения секций сверхпроводящих токоограничителей, выполненные с

учетом зависимости критического тока проводника от индукции магнитного поля, обеспечивающие максимально эффективное использование сверхпроводящего материала при заданном уровне тока срабатывания защиты;

- уменьшение гистерезисных потерь (в номинальном режиме работы токоограничителя) в секционированных устройствах относительно несекционированных, рассчитанных на те же параметры;
- новые способы секционирования, дающие возможность повысить пропускную способность сверхпроводящего токоограничивающего устройства (сверхпроводящего кабеля, для использования его в короткой кабельной линии постоянного тока) при заданных габаритных размерах;
- разработанные методики расчетов габаритных размеров сверхпроводящих токоограничителей и гистерезисных потерь при номинальном режиме работы энергосистемы.

**Структура и объем работы:** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа содержит 150 страниц печатного текста, 6 таблиц, 45 рисунков, списка литературы из 97 наименований на 11 страницах и приложений на 14 страницах.

**В первой главе** представлен обзор существующих типов ограничителей токов различных конструкций.

В сетях современных развивающихся энергосистем различного напряжения максимальный уровень токов короткого замыкания в той или иной степени непрерывно возрастает. При этом требования к электрическим аппаратам, проводникам, силовым трансформаторам (автотрансформаторам) и конструкциям распределительных устройств (РУ) становятся все более жесткими. Проблема согласования (улучшения) параметров электрооборудования с существующими и с ожидаемыми в перспективе уровнями токов КЗ в энергосистемах становится все более актуальной. Для

ее решения необходимо разработать и внедрить в энергосистемах наиболее эффективные методы и средства ограничения токов КЗ.

Возможность использования сверхпроводников в качестве активных элементов устройств, предназначенных для распределения и управления потоком электрической энергии, улучшения режима энергосистем, ограничения токов короткого замыкания позволяет по-новому подойти к решению этой проблемы.

В связи с высокой стоимостью сверхпроводящих материалов большое значение при разработке сверхпроводящих устройств приобретает выбор оптимальной конструкции, обеспечивающей наименьший расход сверхпроводника. Список параметров, которые необходимо варьировать с целью такой оптимизации, достаточно широк и зависит от вида проектируемого устройства (геометрические размеры и форма изделия, величина магнитного поля, картина распределения поля и тока и т.д.) При этом обеспечение условия равнонагруженности сверхпроводника током, то есть, оптимизация в соответствии с заданной зависимостью  $j_c=f(B)$  представляется целесообразным практически для любого изделия.

**Во второй главе** детально рассматриваются сверхпроводящие токоограничители резистивного типа.

Принципиально важной особенностью сверхпроводящего ограничителя тока (СОТ) является свойство перехода сверхпроводникового элемента из сверхпроводящего состояния в нормальное в случае превышения критического значения тока. Это позволяет создать надежное токоограничивающее устройство, не имеющее каких-либо дополнительных внешних управляющих систем. Ограничение тока достигается за счет сопротивления обмотки СОТ, возникающего при её переходе в нормальное состояние.

Для обеспечения достаточной степени токоограничения, резистивный СОТ должен иметь относительно большое активное сопротивление в нормальном (несверхпроводящем) состоянии. Поэтому стоимость

резистивного СОР на 70-80% определяется необходимым количеством ВТСП материала.

Путем секционирования обмотки СОР можно сильно уменьшить габаритные размеры токоограничителя, тем самым и расход сверхпроводящего материала, а также добиться заметного снижения гистерезисных потерь в сверхпроводнике.

Разработана методика расчета характеристик сверхпроводящих токоограничивающих устройств резистивного типа. Разработана методика расчёта гистерезисных потерь для различных конструкций сверхпроводящих резистивных токоограничителей

**В третьей главе** исследованы сверхпроводящие токоограничители индуктивного типа, приводится анализ различных схем и конструкций токоограничивающих устройств.

Разработана методика расчета токоограничивающих устройств трансформаторного и автотрансформаторного типа. Показано, что наиболее удачными являются трансформаторная и автотрансформаторная схемы с чередующимися обмотками.

При использовании сверхпроводящих материалов в обмотках токоограничивающего устройства значительно снижается его масса (более, чем в 30 раз за счет увеличения плотности тока в проводнике), а также уменьшаются электрические потери (более, чем в 7 раз).

Еще одним преимуществом использования сверхпроводника в токоограничивающих устройствах является то, что в большинстве конструкций можно отказаться от быстродействующих коммутационных аппаратов, поскольку токоограничение происходит благодаря естественным свойствам сверхпроводника – переходу его в нормальное (несверхпроводящее состояние) при токе большем критического.

**В четвертой главе** рассмотрены сверхпроводящие вставки постоянного тока как ограничители сверхнормативных токов.

Принципиально возможно ограничение токов КЗ путём использования вставки постоянного тока. При этом необходимо учитывать, что передача больших токов при относительно малых рабочих напряжениях требует новых решений, при которых внешние габариты будут максимально минимизироваться, внешние поля ограничиваться практически до нуля и электрические потери будут предельно низкими. Все эти эффекты достигаются путём применения методики секционирования, описанной в главе 4.

Разработана методика расчета характеристик секционированного кабеля для использования его во вставке постоянного тока. Разработана методика расчёта гистерезисных потерь для кабеля постоянного тока; впервые были предложены модели секционированного кабеля постоянного тока; показано, что использование метода секционирования позволяет существенно уменьшить необходимое количество сверхпроводящего материала по сравнению с не секционированной системой; предложенный способ секционирования сверхпроводящего кабеля постоянного тока позволяет значительно снизить гистерезисные потери в кабеле.

## **1. Аналитический обзор сверхпроводящих токоограничивающих устройств.**

В условиях свободного рынка перед системой развития производства и транспортировки электроэнергии встаёт вопрос о необходимости модернизации электростанций и электросетей, о замене устаревшего оборудования на новое. Решение этой задачи призвано обеспечить надёжное снабжение потребителей качественной электроэнергией.

Возможность использования сверхпроводников в качестве активных элементов устройств, предназначенных для распределения и управления потоком электрической энергии, улучшения режима энергосистем, ограничения токов короткого замыкания привлекала исследователей достаточно давно [1-3]. Получение устойчивого сверхпроводящего состояния при температуре жидкого азота усилило интерес к этой проблеме.

В последние десятилетия большое внимание уделяется исследованию и разработке конструкций, использующих сверхпроводящие материалы, которые дают возможность по-новому подойти к вопросам создания электроэнергетического оборудования. Увеличение плотности тока, повышение предельной мощности, а также наличие особых, присущих только сверхпроводникам, физических свойств, создают предпосылки для разработки высокоэффективных видов оборудования, в том числе и токоограничивающего.

### **1.1 Ограничители токов короткого замыкания.**

В сетях современных развивающихся энергосистем различного напряжения максимальный уровень токов короткого замыкания в той или иной степени непрерывно возрастает. При этом требования к электрическим аппаратам, проводам, силовым трансформаторам (автотрансформаторам) и конструкциям распределительных устройств (РУ) становятся все более жесткими. Проблема согласования (улучшения) параметров

электрооборудования с существующими и с ожидаемыми в перспективе уровнями токов КЗ в энергосистемах становится все более актуальной. Для ее решения необходимо разработать и внедрить в энергосистемах наиболее эффективные методы и средства ограничения токов КЗ, дать методику прогнозирования и оптимизации уровней токов КЗ, а также методику выбора электрооборудования с учетом динамики изменения параметров сети и вероятностного характера возникновения тех или иных повреждений в ее различных точках. Интенсивные работы по указанной проблеме проводятся как в России, так и за рубежом. В частности, важные результаты получены в МЭИ группой, под руководством профессора Неклепаева Б.Н. [4].

С целью уменьшения воздействия токов КЗ на электрооборудование предложены и используются различные методы и средства их ограничения. Учитывая специфику развития современных энергосистем, вопросы устойчивости и надежности их работы, а также технико-экономические характеристики, разрабатываются и исследуются новые средства и способы токоограничения, позволяющие ограничить не только величину, но и продолжительность токов КЗ.

Решение указанной задачи возможно:

- путем повышения быстродействия традиционной коммутационной аппаратуры;
- путем создания и использования новых сверхбыстродействующих коммутационных аппаратов, способных безынерционно, то есть, в течение первого полупериода ограничить и отключить ток КЗ;
- путем использования новых видов токоограничивающих устройств.

Токоограничивающие устройства (ТУ) – это электротехнические устройства, предназначенные для ограничения токов КЗ в электрических сетях различного напряжения, способные ограничивать как установившиеся токи, так и ударный ток КЗ.

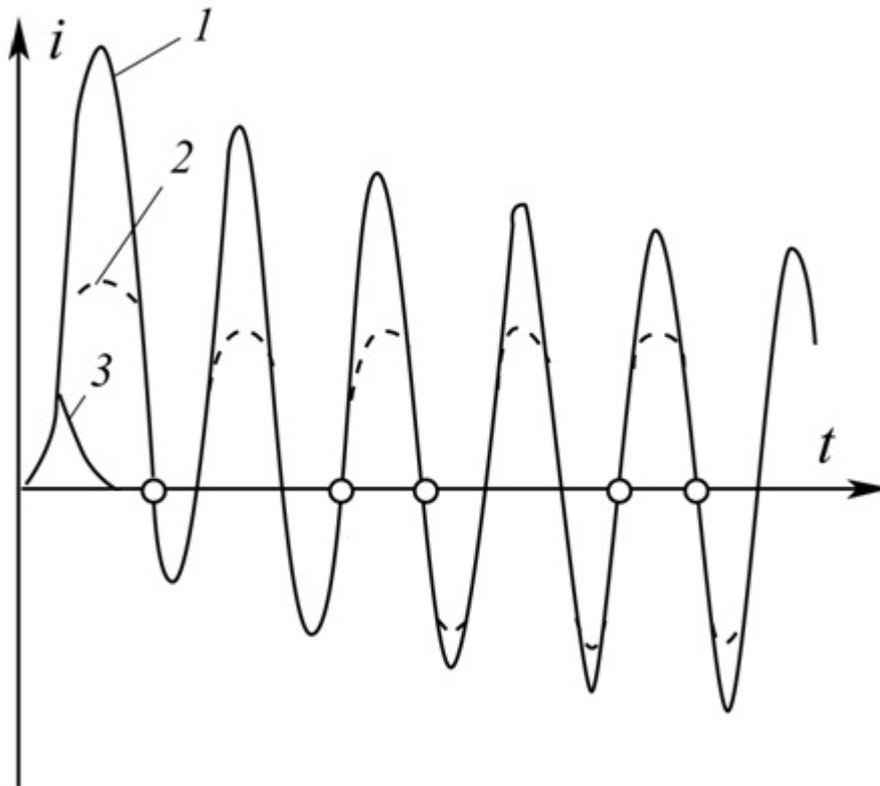


Рис.1.1 Условия отключения и ограничения тока КЗ

(1- ток КЗ в цепи, 2- ограничение тока КЗ безынерционным ТУ, 3-ограничение тока КЗ токоограничивающим коммутационным аппаратом)

Условия протекания, ограничения и отключения токов КЗ показаны на рис.1.1.

Электродинамическое воздействие тока КЗ можно снизить путем использования токоограничивающих коммутационных аппаратов. Таковыми могут быть, например, тиристорные выключатели с принудительной коммутацией, ограничители ударного тока взрывного действия и токоограничивающие предохранители. Использование указанных аппаратов позволяет ограничить, а затем и прервать ток КЗ (кривая 3).

Термическое и электродинамическое воздействие тока КЗ можно снизить путем использования безынерционных токоограничивающих устройств, таких, как реакторы, резонансные токоограничивающие устройства, токоограничивающие устройства со сверхпроводниками и т.п. (кривая 2). В ряде случаев для уменьшения термического воздействия тока КЗ и облегчения работы коммутационной аппаратуры могут быть использованы также и инерционные токоограничивающие устройства,

например, устройство автоматического деления сети или устройство, состоящее из реактора, нормально зашунтированного выключателем [5]. Очевидно, что наибольшее ограничение воздействия тока КЗ достигается при использовании безынерционных токоограничивающих коммутационных аппаратов, однако, такое решение задачи сдерживается либо отсутствием аппаратов с необходимыми параметрами и эксплуатационными характеристиками, либо их высокой стоимостью. Требуют также разработки, освоения, серийного выпуска и снижения стоимостных показателей синхронизированные выключатели и безынерционные токоограничивающие устройства.

В общем случае параметры безынерционного ТУ, как управляемого элемента энергосистемы должны удовлетворять условиям:

- 1)  $Z_{БТУ} \rightarrow 0, \Delta U_{БТУ} \rightarrow 0, \text{ при } I < I_{ГР};$
- 2)  $X_{БТУ} \approx -\Delta X_{НГ}, R_{БТУ} \approx -\Delta R_{НГ}, \text{ при } I > I_{ГР};$
- 3)  $I_{ГР} > I_{НГ.доп};$
- 4) вносить минимум нелинейных искажений в параметры защищаемой цепи в нормальном режиме её работы;
- 5) иметь стабильные характеристики при изменении схемы сети.

Здесь приняты следующие обозначения:

$I$  – ток в цепи с безынерционным ТУ,  $I_{ГР}$  – граничный ток, при котором безынерционное ТУ должно «сработать»;  $\Delta X_{НГ}$  и  $\Delta R_{НГ}$  – изменение реактивного и активного сопротивлений нагрузки за безынерционным ТУ при КЗ;  $I_{НГ.доп}$  – допустимый расчетный ток перегрузки цепи с безынерционным ТУ.

Предложено большое число видов ТУ, отличающихся составом элементов, принципом действия, характеристиками, быстродействием, конструктивным исполнением. Полученные результаты сведены в таблицу 1.1.

**Таблица 1.1.**

Метод или средство токоограничения	Номинальное напряжение сети, кВ							
	6	10	20	35	110	220	330	500
Схемные решения	+	+	+	+	+	+	+	+
Деление сети	+	+	+	+	+	+	+	+
Выключатели синхронизированные	-	-	-	-	+	+	+	+
Выключатели тиристорные	+	+	-	-	-	-	-	-
Ограничитель ударного тока	+	+	+	+	-	-	-	-
Плавкие предохранители	+	+	+	+	-	-	-	-
Реакторы	+	+	+	+	+	+	+	+
Управляемые реакторы	+	+	-	-	-	-	-	-
Трансформаторы с расщепленной обмоткой	+	+	+	+	+	+	+	+
Автотрансформаторы с расщепленной обмоткой	-	-	-	-	-	+	+	+
Резонансные токоограничивающие устройства	+	+	+	+	+	+	+	+
Трансформаторные токоограничивающие устройства	-	-	-	+	+	+	+	+
Реакторно-вентильные токоограничивающие устройства	+	+	-	-	-	-	-	-
Токоограничивающие устройства со сверхпроводниками	+	+	+	+	+	+	-	-
Вставки постоянного тока	-	-	-	-	-	+	+	+
Вставки переменного тока не промышленной частоты	-	-	-	-	-	+	+	+
Частичное разземление нейтралей трансформаторов	-	-	-	-	+	+	-	-
Включение в нейтраль трансформаторов резисторов, реакторов, комплексных переменных сопротивлений.	-	-	-	-	+	+	+	+
Замена автотрансформаторов на трансформаторы	-	-	-	-	-	+	+	+
Размыкание, исключение третичной обмотки автотрансформаторов	-	-	-	-	-	+	+	+

В настоящее время в энергосистемах для ограничения токов КЗ используются: стационарные и автоматические делители сети, токоограничивающие реакторы, трансформаторы с расщепленной обмоткой низкого напряжения, а также разземление нейтральной части [5,54,55].

Ограничители ударного тока взрывного действия представляют собой сверхбыстродействующие управляемые коммутационные аппараты одноразового действия с относительно большими номинальными параметрами [6,42]. Конструктивно ограничитель ударного тока представляет собой герметизированный цилиндр, внутри которого располагается токонесущий проводник с вмонтированным в него пиропатроном. Сигнал на взрыв пиропатрона подается от внешнего управляющего устройства. Последнее получает информацию о КЗ от измерительного датчика, реагирующего на величину тока КЗ и на его первую производную. Ограничение тока КЗ достигается за время порядка 0,5 мс. Полное время отключения цепи составляет примерно 5 мс, т.е. 1/4 периода изменения тока промышленной частоты. Для ограничения перенапряжения в сети, возникающего в результате быстрого отключения тока, взрывной элемент ограничителя шунтируется плавким предохранителем. Ограничители ударного тока, рассчитанные на использование в сетях высокого напряжения, разрабатываются, в частности, ОИВТ РАН.

Остальные методы и средства ограничения токов КЗ, перечисленные в таблице 1.1, находятся в стадии исследований и проектной проработки.

## **1.2 Особенности конструкции сверхпроводящих токоограничивающих устройств.**

Современная наука пытается предложить новые эффективные решения, как на иных физических принципах, так и на более перспективных конструктивных и технологических решениях [61-63]. Новые решения могут быть основаны на сверхпроводниковых технологиях, к которым уже

обратились и достигли первых успехов многие технически развитые страны мира.

Сверхпроводящий ограничитель тока, скорее всего, будет первым электроэнергетическим устройством, которое найдет широкое практическое применение. В ТУ используются естественные свойства сверхпроводника – быстро и на порядки величин менять электрическое сопротивление при переходе из сверхпроводящего состояния в нормальное, либо терять способность экранировать магнитное поле и соответственно менять полное сопротивление устройства.

### 1.2.1 Резистивные токоограничители

Принципиальные схемы ТУ со сверхпроводниками (СП) приведены на рис. 1.2 [5]. На схеме рис. 1.2 показан СП без внешнего управления.

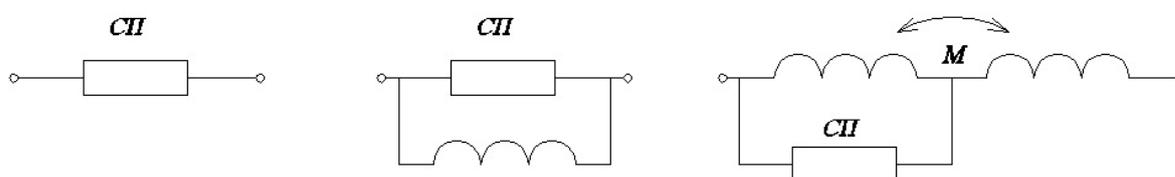


Рис.1.2. Токоограничивающие устройства со сверхпроводниками

Этот элемент может быть включён или в защищаемую линию или в цепь секционного (шиносоединительного) выключателя распределительного устройства. При КЗ в сети, когда ток в цепи СП становится больше критического, сверхпроводник переходит в нормальное состояние, ограничивая ток КЗ (резистивное токоограничение). Подобная схема токоограничения была предложена К.Н. Калашниковым в 1936 году. Следует отметить, что в этой схеме должны быть приняты меры для защиты самого сверхпроводника от перегрева при переходе в нормальное (не сверхпроводящее) состояние. В противном случае он разорвет цепь как токоограничивающий предохранитель или как ограничитель ударного тока

взрывного действия, выйдет из строя и будет непригоден для дальнейшей эксплуатации (одноразовое действие).

В целях удобства монтажа, ремонта и организации серийного выпуска сверхпроводниковых элементов ограничителя тока КЗ, выпуска ТУ на различные номинальные параметры по току и напряжению целесообразно применить модульную конструкцию, так, чтобы путём параллельно-последовательного соединения модулей обеспечить требуемую величину тока и напряжения ТУ. Именно по этому пути ведутся разработки в ФГУП ВЭИ. Различные варианты модульных ограничителей тока КЗ разработаны ведущими производителями высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент второго поколения в США [8].

Наиболее известные конструкции ВТСП элементов на основе ленточных проводников второго поколения условно можно разделить на три основных типа исполнения:

1. катушка в виде меандра [11,99] (см. рис 1.3а).

**достоинства** – простота изготовления, оптимальный режим охлаждения сверхпроводника.

**Недостатки** – много переходных соединений, увеличение переходных сопротивлений, сравнительно высокая индуктивность, проблемы с обеспечением жёсткости ВТСП ленты, ограниченная длина отрезка ленты.

2. соленоид с бифилярной намоткой [9].

**достоинства** – более низкая индуктивность по сравнению с меандром, большая длина ВТСП ленты в одном слое, меньшее число переходных соединений.

**Недостатки** – хуже охлаждение ленты, сложность изготовления.

3. плоская катушка с бифилярной намоткой (pancake) [10,99] (см.рис.1.3б).

**достоинства** – меньшая индуктивность, компактность, меньший расход жидкого азота, меньшее число переходных сопротивлений.

**Недостатки** – хуже охлаждение проводника, большая сложность изготовления.



(а) – катушка в виде меандра (б) – плоская катушка с бифилярной  
Рис. 1.3. Примеры различных конструкции ВТСП элементов  
токоограничителей

При существующих ценах на ВТСП ленты и криогенное оборудование, резистивные ТУ с длительностью режима токоограничения порядка 0,1-0,2 с (время отключения сетевого выключателя) представляется экономически нецелесообразным. Существенно уменьшить объем ВТСП материала и, тем самым, сделать ТУ конкурентоспособным позволяет концепция построения коммутационного ТУ. Коммутационное ТУ (рис.1.4) содержит последовательно соединенные ВТСП модуль и быстродействующий выключатель со временем отключения  $\Delta t$ , в несколько раз меньшим времени отключения сетевого выключателя [12]. Для уменьшения токовой нагрузки на ВТСП элемент параллельно ВТСП модулю присоединяется шунтирующее сопротивление  $Z_{ТУ}$ .

Использование БВ позволяет сократить длительность режима ограничения тока почти на порядок по сравнению со временем отключения сетевого выключателя. Поэтому, схема коммутационного ТУ позволяет ограничить амплитуду тока КЗ до приемлемого уровня при сравнительно

небольшом объёме ВТСП ленты. В качестве быстродействующего выключателя предлагается использовать вакуумный выключатель [7,13].

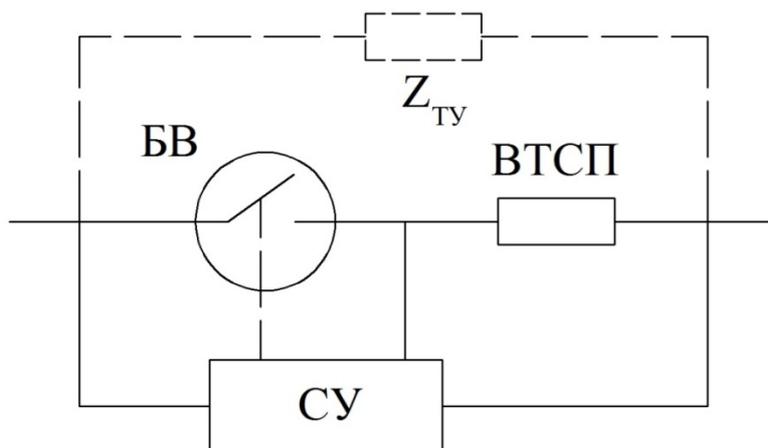


Рис.1.4. Схема коммутационного сверхпроводящего токоограничителя. (БВ – быстродействующий выключатель, СУ – система управления)

### 1.2.2 Индуктивные токоограничители

Обычно считалось, что в реальных мощных электроустановках наиболее просто и наиболее полно может быть выполнено условие (2 см. стр. 17) путем подбора и введения в поврежденную цепь дополнительного индуктивного сопротивления. Работа по созданию ТУ индуктивного типа начались после открытия ВТСП в 1986 году. Вначале появились изделия из ВТСП керамики. В 1996 году в Швейцарии (ABB) было создано ТУ в виде трехфазного трансформатора мощностью 1,2 МВА, в качестве вторичной обмотки использовались ВТСП керамические кольца (Ві – 2212). Основные сложности при разработке заключались в создании ВТСП колец большого диаметра. Известны ВТСП кольца диаметром до 0,48 м [30].

Одним из основных недостатков является то, что требуется значительное время для подготовки ТУ к повторному срабатыванию, связанное с охлаждением сверхпроводящего элемента до начальной температуры. Кроме того, не решена проблема борьбы с термоупругими напряжениями. После разогрева и перехода в нормальное состояние ВТСП керамика не становится диэлектриком, а обладает определенной, хотя и низкой, проводимостью. Поэтому температура ВТСП кольца будет

увеличиваться, что может привести к развитию значительных термоупругих напряжений и разрушению кольца, что вполне естественно для хрупкой массивной керамики.

В России аналогичные исследования проводились в ОИВТ РАН [14], однако, испытать ВТСП 2g [98] кольца свыше 0,1 м диаметром не представилось возможным.

Разработанные в ЭНИН [15] принципы и методы расчета ТУ со сложной топологией магнитопровода базируются на технических характеристиках колец (экранов), соответствующих низкотемпературным проводникам. При этом основные выводы практически не зависят от того, из какого сверхпроводящего материала сделан экран, поскольку основным условием формирования работы экрана в качестве базового элемента коммутатора магнитного потока является распределение поля на экранируемой обмотке магнитопровода в нормальных и аварийных режимах энергосистемы, а технические характеристики используемых ВТСП экранов, в конечном счете, должны быть не хуже, чем у их низкотемпературных аналогов. При этом в качестве основного достоинства ВТСП в ТУ выступает возможность снижения сложности и затрат при обеспечении их криостатирования.

На рис.1.5 приведена принципиальная схема однофазного индуктивного выключателя-токоограничителя с двумя встречно включенными обмотками  $W_1$  и  $W_2$  и экранирующей обмоткой  $W_3$ . Входное напряжение  $U_1$  связано с обмотками  $W_1$  и  $W_2$ ; выходное  $U_2$  – с обмоткой  $W_1$ . При сверхпроводящем состоянии экрана  $W_3$  поток в стрежень  $R_2$  не проходит, и  $U_2=U_1$ . При появлении в контуре экрана резистивности и соответствующем подборе витков  $W_1$  и  $W_2$  поток, создаваемый обмоткой  $W_2$ , компенсирует поток обмотки  $W_1$  и  $U_1=0$ . Поскольку обмотка  $W_1$  связана с источником питания и нагрузкой по автотрансформаторной схеме с коэффициентом трансформации  $k_{тр}=1$ , то они рассчитываются только на намагничивающий ток.

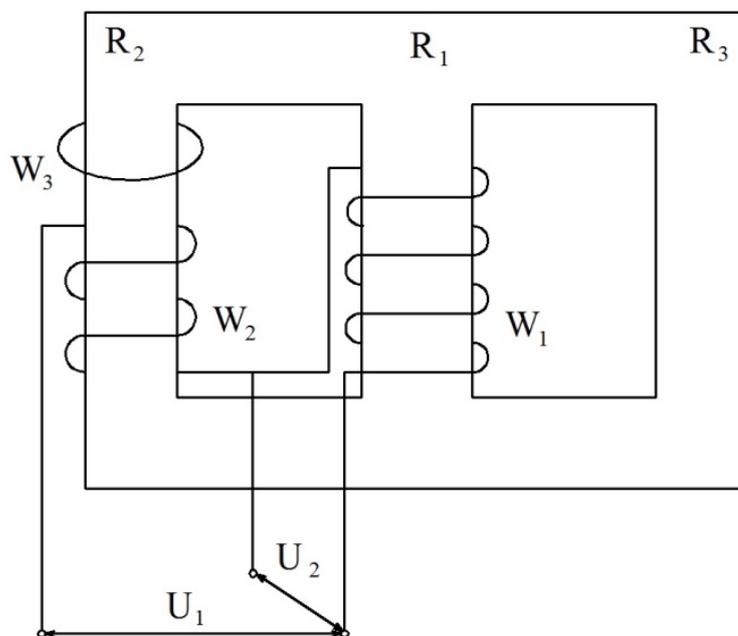


Рис. 1.5. Принципиальная схема однофазного токоограничителя

Для уменьшения влияния аварийных токов на шины и оборудование станции необходимо ограничение их максимальных (ударных) значений, причем наличие у сверхпроводников критических параметров перехода в нормальное состояние не требует проведения защитных мероприятий с максимальным быстродействием: (200-500) мкс. В реализации цели токоограничения трансформаторные устройства с переключателями магнитного потока (рис. 1.6) могут помимо требуемых временных характеристик обеспечить и наименьшее значение послеаварийного тока при достаточно малом удельном сопротивлении материала сверхпроводящего экрана.

Последняя коммерческая разработка ТУ трансформаторного типа на 220 кВ представлена в [16]. Реализованный принцип действия приводит к появлению потерь активной и реактивной мощности. Также к недостаткам ТУ следует отнести габаритные размеры и вес ТУ.

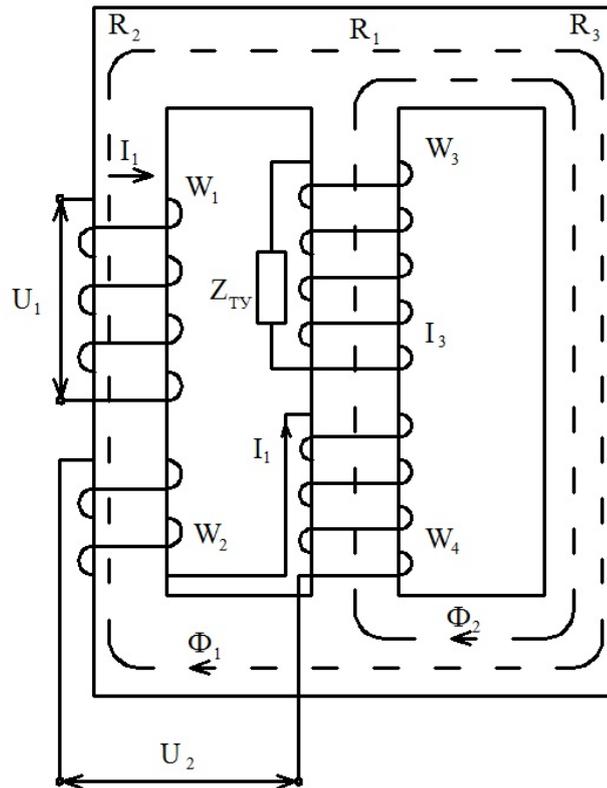


Рис. 1.6. Схема трансформаторного устройства с коммутацией магнитного потока

В статье [17] приведены расчеты различных вариантов ТУ трансформаторного типа с обычными и сверхпроводящими обмотками без магнитопровода на 110 кВ. Показано, что можно уменьшить вес и габариты более чем на порядок по сравнению с обмотками из обычного проводника [60].

Однако в статье [18,31] показано, что более экономичным является использование ТУ автотрансформаторного типа.

### 1.2.3 Короткая сверхпроводящая кабельная линия постоянного тока

Основная область применения линий постоянного тока – передача больших мощностей на дальние расстояния. Однако особые свойства сверхпроводящих линий постоянного тока позволяют использовать их и в других случаях, например, при пересечении больших водных пространств, при связи не синхронно работающих систем или систем с различной частотой. В последнее время разрабатываются проекты ВТСП линий

постоянного тока для ввода больших мощностей в крупные города. Преимущество такого решения состоит в том, что одновременно не увеличиваются мощности коротких замыканий, что потребовало бы весьма дорогостоящих мероприятий по их ограничению или замены аппаратуры распределительных сетей [19].

Следует отметить, что ограничение токов КЗ реализуется во всех случаях применения сверхпроводящих линий постоянного тока, так как последние сами рассматриваются как одно из средств решения этой сложной инженерной проблемы.

Структурная схема электропередачи постоянного тока приведена на рис.1.7 . Здесь эта передача показана как связь между двумя электрическими системами. В этих системах генерация электрической энергии, её распределение и потребление осуществляется на переменном токе. Постоянный ток используется лишь для транспорта электрической энергии из одной системы в другую.

Для того чтобы осуществить передачу электрической энергии постоянным током необходимо энергию переменного тока, выработанную генераторами передающей системы, преобразовать в энергию постоянного тока. В этом виде энергия передается по линии, а на приемном конце она вновь преобразуется в энергию переменного тока и передается в приемную систему.

Преобразование электрической энергии осуществляется с помощью преобразователей  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , расположенных по концам передачи и связанных с передающей и приемной системами. Один из этих преобразователей является выпрямителем, другой – инвертором.

Преобразователи обладают свойством реверсивности. При изменении направления передачи мощности – от  $C_2$  к  $C_1$ ,  $\Pi_2$  становится выпрямителем, а  $\Pi_1$  инвертором. При этом направление тока в линии остается неизменным, что определяется свойствами преобразователей, но меняется их полярность.

Короткие линии электропередачи постоянного тока могут выполнять, кроме транспортных функций, функции элемента, связывающего сети различного напряжения, или функции токоограничивающего устройства. Благодаря наличию линии постоянного тока, ток КЗ в точке  $K_1$  (на стороне выпрямителя) определяется только параметрами примыкающей системы  $C_1$ . Подпитка же со стороны линии постоянного тока отсутствует. При КЗ в точке  $K_2$  (на стороне инвертора), ток в месте КЗ определяется, в основном, параметрами системы  $C_2$ . В результате, подпитка со стороны линии постоянного тока не превышает ее номинального нагрузочного тока.

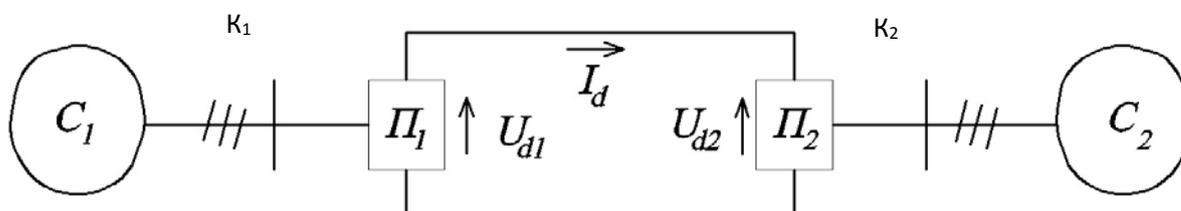


Рис.1.7. Структурная схема линии постоянного тока

На рисунке величины с индексом  $d$ :  $U_{d1}$ ,  $U_{d2}$ ,  $I_d$  – напряжения и токи на стороне выпрямленного тока.

Таким образом, токи КЗ в месте включения линии постоянного тока не возрастают, и, следовательно, замена коммутационного оборудования не требуется.

Помимо этого, использование ВТСП кабельных линий переменного [20] и постоянного [21,58,59] тока существенно снижает потери в линиях и позволяет повысить плотность передаваемой энергии без увеличения напряжения. Более того, ВТСП кабельная линия постоянного тока имеет несколько дополнительных преимуществ:

- возможность соединения различных частей энергосистемы по низкой стороне напряжения, что повышает надежность энергообеспечения без увеличения токов КЗ;
- защита от каскадных отключений;

- регулирование потока мощности;

Применение ВТСП кабельной линии постоянного тока существенно увеличивает надежность энергоснабжения потребителей за счет взаимного резервирования систем.

*Выводы по разделу*

В НИИПТ г. Санкт-Петербург проведено исследование, одна из целей которого – сравнить эффективность сверхпроводящей кабельной линии постоянного тока с эффективностью применения других современных токоограничивающих средств (токоограничивающих реакторов, и сверхпроводящих ТУ) с точки зрения снижения уровней токов КЗ.

Сравнение возможностей применения различных видов электропередач и токоограничителей в условиях систем больших городов представлено в таблице 1.2.

**Таблица 1.2.** Сравнение возможностей применения различных видов электропередач и токоограничителей в условиях энергосистем мегаполисов

№	Технология	Повышение режимной управляемости электрической сети	Ограничение токов короткого замыкания	Нормализация напряжений в эл. сети	Снижение потерь мощности в эл. сети
<b><u>Электропередачи</u></b>					
1	Кабельная линия переменного тока	☒	☒	±	±
2	Газоизолированная линия электропередачи	☒	☒	±	☑
3	Короткая сверхпроводящая кабельная линия постоянного тока	☑	☑	☑	☑
<b><u>Токоограничивающие устройства</u></b>					
4	Токоограничивающий реактор	☒	☑	☒	☒
5	Сверхпроводящий токоограничитель	☒	☑	☒	☑

Условные обозначения в таблице:

Применение технологии способствует устранению соответствующей проблемы в энергосистемах.

Применение технологии не способствует устранению соответствующей проблемы в энергосистемах (либо применение технологии не связано напрямую с решением рассматриваемой проблемы в энергосистемах).

± Применение технологии может, как усугублять соответствующую проблему в энергосистемах, так и способствовать устранению этой проблемы.

Из таблицы видно, что сверхпроводящая кабельная линия постоянного тока является комплексным устройством, необходимым, в первую очередь, для повышения режимной управляемости и ограничения уровней токов КЗ.

В тоже время, как показало исследование, применение сверхпроводящих ТУ (как резистивного, так и индуктивного типа) снижает уровень токов КЗ в электрической сети на 20-30%. Таким образом, дальнейшее развитие технологий токоограничения на основе применения высокотемпературных сверхпроводящих материалов может обеспечить более высокие показатели эффективности ограничения токов КЗ в энергосистемах.

### **1.3 Секционирование сверхпроводящих устройств.**

При проектировании сверхпроводящих устройств необходимо учитывать, что магнитное поле и плотность тока не являются независимыми переменными, величина которых ограничивается только механическими напряжениями и выделением тепла. В данных устройствах они связаны между собой через критические параметры сверхпроводника.

Критическая плотность тока сверхпроводника  $j_c$  уменьшается как с ростом температуры, так и с увеличением внешнего магнитного поля (исключение составляют лишь редкие аномалии – незначительное локальное увеличение  $j_c$  в слабом магнитном поле, называемое «пик эффектом»).

Характер зависимости  $j_c=f(B)$  идентичен для низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводников. Однако, для ВТСП (особенно для ВТСП первого поколения), работающих при температурах близких к азотным уменьшение  $j_c$  более существенно.

Из-за наличия связи между  $j_c$  и  $B$  рациональное распределение токов между отдельными частями сверхпроводящей обмотки радикально отличается от случая, при котором обмотка выполнена из несверхпроводящего материала. Наилучший результат может быть достигнут, когда во всех частях обмотки протекает ток максимальной плотности, допускаемой зависящими от поля параметрами сверхпроводника, т.е. когда плотность тока возрастает по мере уменьшения локального магнитного поля. Распределяя таким образом плотность тока в обмотке, можно получить заданное поле с наименьшим количеством требуемого материала (или наоборот, максимальное поле при заданном количества материала). Одним из наиболее важных является случай, при котором средняя плотность тока (плотность тока, рассчитанная на единицу длины сечения обмотки) постоянна по всей обмотке, а плотность тока в сверхпроводнике изменяется. Это означает, что сверхпроводник неравномерно распределен по обмотке [22].

В сверхпроводящей обмотке, изготовленной из одного куска провода, предельное значение тока определяется максимальным значением магнитного поля на её витках. Поэтому, части обмотки, в которых поле меньше максимального значения, оказываются «незагруженными» током. Более равномерную нагрузку можно получить, если обмотку разбить на отдельные секции, питаемые от разных источников тока. В этом случае ток каждой секции устанавливается в соответствии с максимальным значением магнитного поля на ее витках, а не с максимумом поля для всей обмотки [23].

Однако, в работе [24], предлагается способ, не требующий нескольких источников тока, - секции соединяются последовательно, но выполняются из сверхпроводящей проволоки различного диаметра.

Самым эффективным применением ВТСП являются сверхпроводящие силовые кабели для передачи электроэнергии. Благодаря удачной конфигурации магнитного поля в таких кабелях, его влияние на токонесущие свойства ВТСП лент минимизировано. В мире ведется не менее десяти крупных проектов по созданию и испытаниям предпромышленных образцов ВТСП силовых кабелей различной длины.

По ВТСП кабелю возможна передача как переменного, так и постоянного тока. Особый интерес представляет передача постоянного тока. За счет большой плотности тока передача может осуществляться при относительно небольшом напряжении [25].

Сверхпроводящие силовые кабели как постоянного, так и переменного тока, как правило, выполняются многослойными. При их проектировании проблема неравномерной загрузки слоев током возникает не только в связи с зависимостью  $j_c$  от  $B$ , но и в связи с различием в индуктивности и взаимной индуктивности слоев. Например, ВТСП кабель на рабочий ток 20 кА, описанный в [26], состоит из многослойных лент, соединенных параллельно в слои с различным шагом скрутки и числом лент в слое. При этом внешние слои имеют меньшую индуктивность по сравнению с внутренними, и распределение токов таково, что во внешних слоях ток больше, чем во внутренних. В биполярном кабеле [26] токи слоев, принадлежащих прямому и обратному проводу разнонаправлены. От порядка чередования таких слоев существенно зависит распределение и величина собственного магнитного поля в кабеле и, следовательно, его токонесущая способность.

В связи с высокой стоимостью сверхпроводящих материалов большое значение при разработке сверхпроводящих устройств приобретает выбор оптимальной конструкции, обеспечивающей наименьший расход сверхпроводника. Список параметров, которые необходимо варьировать с целью такой оптимизации, достаточно широк и зависит от вида проектируемого устройства (геометрические размеры и форма изделия, величина магнитного поля, картина распределения поля и тока и т.д.) При

этом обеспечение условия равнонагруженности сверхпроводника током, то есть, оптимизация в соответствии с заданной зависимостью  $j_c=f(B)$  представляется целесообразным практически для любого изделия.

Зависимость  $j_c=f(B)$  является индивидуальной характеристикой сверхпроводника. Она определяется экспериментально и, в целях использования при расчетах, описывается различными модельными соотношениями. Наиболее удобной представляется зависимость вида [27]:

$$j_c = \frac{\alpha}{|B|^\gamma}, \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  и  $\gamma$  – константы, зависящие от свойств сверхпроводника. В качестве частных случаев эта зависимость включает простейшую (и поэтому, популярную) модель  $j_c=const$  (при  $\gamma=0$ ) и модель  $B \cdot j_c=const$  (при  $\gamma=1$ ), исследуемую в ОИВТ РАН [28]. Эта же модель может использоваться и при описании конструктивной критической плотности тока, которая связана с  $j_c$  очевидным соотношением:

$$j_{ck} = j_c \cdot \frac{S_s}{S}, \quad (1.2)$$

где  $S_s$  и  $S$  – соответственно площадь сечения сверхпроводящего материала и общая площадь содержащего его конструктивного элемента. Из (1.2) видно, что переход к описанию конструктивной критической плотности тока заключается лишь в изменении коэффициента  $\alpha$ .

Необходимо отметить также, что для крупных магнитных систем с высокими значениями магнитной индукции (как например в ФИАН [29]) помимо зависимости  $j_c=f(B)$  необходимо учитывать связь распределения тока с электродинамическими нагрузками, так как именно они могут оказаться лимитирующими. Например, если электродинамические нагрузки воспринимаются силовыми элементами, располагающимися равномерно по объёму обмотки (например, в длинных цилиндрических обмотках), то для обеспечения постоянной электродинамической нагрузки должно выполняться соотношение  $f_v=B \cdot j_k=const$ .

Очевидно, что оптимизация конструкций, при наличии большого количества варьируемых параметров, требует многочисленных вариантных расчетов. Для решения таких задач необходим метод электромагнитного расчёта устройств различных конфигураций, учитывающий зависимость критической плотности тока от индукции магнитного поля и позволяющий проанализировать эффективность этих конфигураций по ряду параметров - расход сверхпроводника, габаритные размеры и т. д.

Задача настоящей работы состоит в разработке различных способов секционирования обмоток сверхпроводящих токоограничивающих устройств и исследовании их влияния на геометрические параметры и эффективность работы сверхпроводящих токоограничивающих устройств.

#### **1.4 Цель работы. Постановка задачи исследования**

Под секционированием сверхпроводящего устройства, являющегося частью ограничителя тока, подразумевается разбиение его на несколько частей кабеля, кольца, обмотки или магнитной системы, отделённых друг от друга зазорами и имеющих взаимно встречное включение, связанных общим магнитным полем.

Целью настоящей работы является разработка рациональных способов секционирования сверхпроводящих элементов токоограничителей (кабеля, кольца, обмотки, магнитной системы) для обеспечения максимальной эффективности использования сверхпроводящего материала. Необходимо также исследовать влияние способа секционирования и соотношений геометрических размеров сверхпроводящего устройства на пропускную способность токоограничителя и потери в сверхпроводнике (гистерезисные) при нормальном режиме работы энергосистемы.

На защиту выносятся:

- рациональные способы секционирования и схемы соединения секций сверхпроводящих токоограничителей, выполненные с

учетом зависимости критического тока проводника от индукции магнитного поля, обеспечивающие максимально эффективное использование сверхпроводящего материала при заданном уровне тока срабатывания защиты;

- уменьшение гистерезисных потерь (в номинальном режиме работы токоограничителя) в секционированных устройствах относительно несекционированных, рассчитанных на те же параметры;
- новые способы секционирования, дающие возможность повысить пропускную способность сверхпроводящего токоограничивающего устройства (сверхпроводящего кабеля, для использования его в короткой кабельной линии постоянного тока) при заданных габаритных размерах;
- разработанные методики расчетов габаритных размеров сверхпроводящих токоограничителей и гистерезисных потерь при номинальном режиме работы энергосистемы.

## 2 Сверхпроводящие токоограничители резистивного типа.

Принципиально важной особенностью сверхпроводящего ограничителя тока (СОТ) является свойство перехода сверхпроводникового элемента из сверхпроводящего состояния в нормальное в случае превышения критического значения тока. Это позволяет создать надежное токоограничивающее устройство, не имеющее каких-либо дополнительных внешних управляющих систем. Ограничение тока достигается за счет сопротивления обмотки СОТ, возникающего при её переходе в нормальное состояние [71,72,75,76,93,95]. Степень ограничения установившегося тока КЗ характеризуется величиной  $K_{ОГР}=I_{КЗ(без\ СОТ)}/I_{КЗ(с\ СОТ)}$ .

Для обеспечения достаточной степени токоограничения, резистивный СОТ должен иметь относительно большое активное сопротивление в нормальном (несверхпроводящем) состоянии. Увеличение активного сопротивления резистивного СОТ, как правило, достигается за счет увеличения количества сверхпроводящего материала. При этом стоит учитывать, что стоимость СОТ на 70-80% определяется количеством использованного ВТСП материала [33, 57].

На рис.2.1 показана принципиальная схема цепи с выключателем  $B$ . Этот выключатель представляет собой комбинацию переменного сопротивления  $R_B$  и промежутка  $\Pi$ , служащего для размыкания остаточного тока после введения в цепь полного сопротивления. В размыкаемой цепи обычно есть сопротивление  $R_H$  (нагрузка или собственное сопротивление контура) и индуктивность цепи  $L$ . В замкнутом состоянии цепи промежуток  $\Pi$  замкнут, а сопротивление  $R_B$  полностью выведено. При установившемся состоянии цепи величина тока в ней равна:

$$I_H=U_H/R_H \quad (2.1)$$

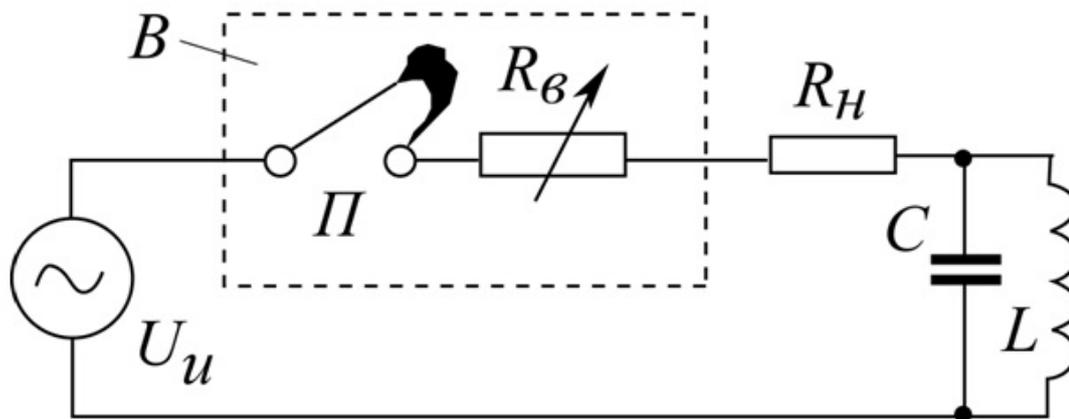


Рис.2.1. Размыкание цепи с ограничением тока с помощью активного сопротивления

Процесс размыкания цепи выключателя  $B$  происходит следующим образом. Сначала в цепь вводится сопротивление  $R_B$  до наибольшей его величины  $R_{B\max}$ . Остаточный ток цепи при установившемся состоянии равен:

$$I_{ост} = U_U / (R_{B\max} + R_H). \quad (2.2)$$

Остаточный ток в цепи должен быть существенно ниже, чем начальный ток  $I_H$ , определяемый собственным сопротивлением цепи  $R_H$  (при  $R_B=0$ ), так как  $R_{B\max} \gg R_H$ .

Промежуток  $\Pi$  будет отключать остаточный ток  $I_{ост}$ , и на его контактах будет возникать дуга небольшой мощности, гашение которой не представляет существенных затруднений. В принципе, такой метод отключения может быть применен и при постоянном, и при переменном токе.

При медленном введении сопротивления в цепь процесс протекает спокойно, без заметных перенапряжений.

Однако из [32] следует, что при введении сопротивления  $R_B$  могут возникать перенапряжения как на индуктивности за счет быстрого спада тока ( $L di/dt$ ), так и на сопротивлении  $u_R = iR_B$ . Это напряжение при медленном введении сопротивления остается ниже  $U_U$  и только в пределе ( $R_B(t) \rightarrow R_{B\max}$ ) достигает значения  $U_U$ . При быстром введении сопротивления  $R_B(t)$  ток в

цепи  $i$  не будет определяться соотношением, справедливым при медленном введении сопротивления (статическая характеристика), то есть:

$$i_y(t) = U_H / (R_B(t) + R_H) \quad (2.3)$$

При быстром изменении сопротивления он будет больше за счет влияния индуктивности, и, следовательно, напряжение  $U_R$  может оказаться значительно большей величиной, чем напряжение источника и опасным с точки зрения перекрытия изоляции сопротивлением  $R_B(t)$ .

Весь этот процесс может характеризоваться дифференциальным уравнением:

$$U_H = i(R_B(t) + R_H) + L di/dt. \quad (2.4)$$

Общее решение этого уравнения имеет вид:

$$i = \exp\left(-\frac{1}{L} \int (R_B(t) + R_H) dt\right) \left[ \frac{U_H}{L} \int \exp\left(\frac{1}{L} \int (R_B(t) + R_H) dt\right) dt + C \right]. \quad (2.5)$$

Частные решения могут быть получены, если задается функция

$$R_B(t) = f(t) \quad (2.6)$$

В реальных цепях могут встретиться довольно значительные индуктивности, существенно замедляющие спад тока в цепи при быстром введении сопротивления выключателя  $R_B(t)$ , и, следовательно, ведущие к опасным повышениям падения напряжения на сопротивлении.

## 2.1 Влияние секционирования на характеристики сверхпроводящего резистивного токоограничителя.

### Описание конструкции СОТ

Как правило, СОТ резистивного типа состоит из нескольких сверхпроводящих секций [34]. Представленная концепция СОТ основана на конструкции цилиндрического секционированного ВТСП устройства, описанной в [35,36]. Данное устройство может представлять собой как секционированный кабель, с концентрическими секциями, так и массивное изделие, секции которого состоят из керамических колец, и т.д. Пример

такого коаксиального секционирования представлен на рис. 2.2. Отличие этой модели от модели, представленной в [35,36] состоит в том, что секции СОР соединены не параллельно, а параллельно-последовательно, как показано на рис.2.3.

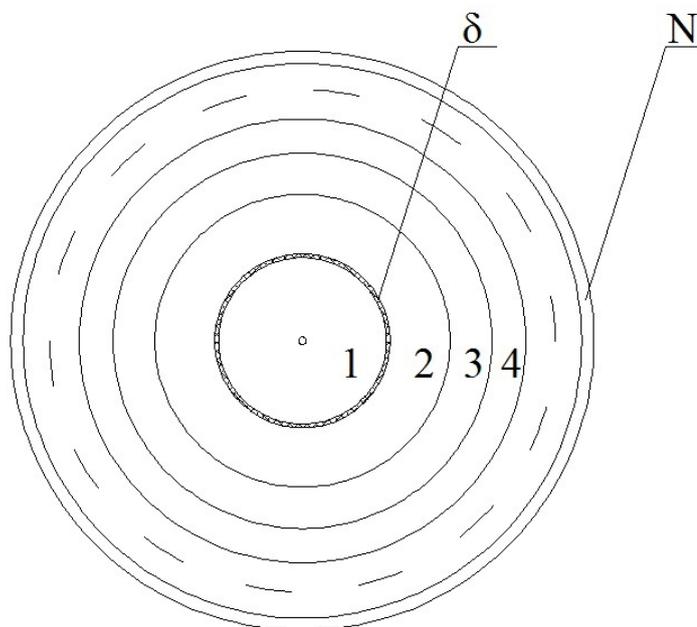


Рис. 2.2. Схема расположений секций СОР

Для реализации схемы рис.2.3 СОР должен содержать нечетное количество секций.

Критическая плотность тока сверхпроводника существенно зависит от локального поля  $B$ . Количественно эту зависимость можно описать моделью критического состояния [27]:  $j_c = \frac{\alpha}{|B|^\gamma}$ , где  $\alpha$  и  $\gamma$  – константы, зависящие от свойств сверхпроводника. Поскольку распределение магнитного поля по сечению СОР зависит от геометрических размеров секций, последние и определяют эффективность использования сверхпроводника, а, следовательно, и стоимость СОР.

При расчете предполагалось, что СОР имеет цилиндрическую форму, при этом его диаметр много меньше длины. В этом случае влиянием краевых (торцевых) эффектов можно пренебречь.

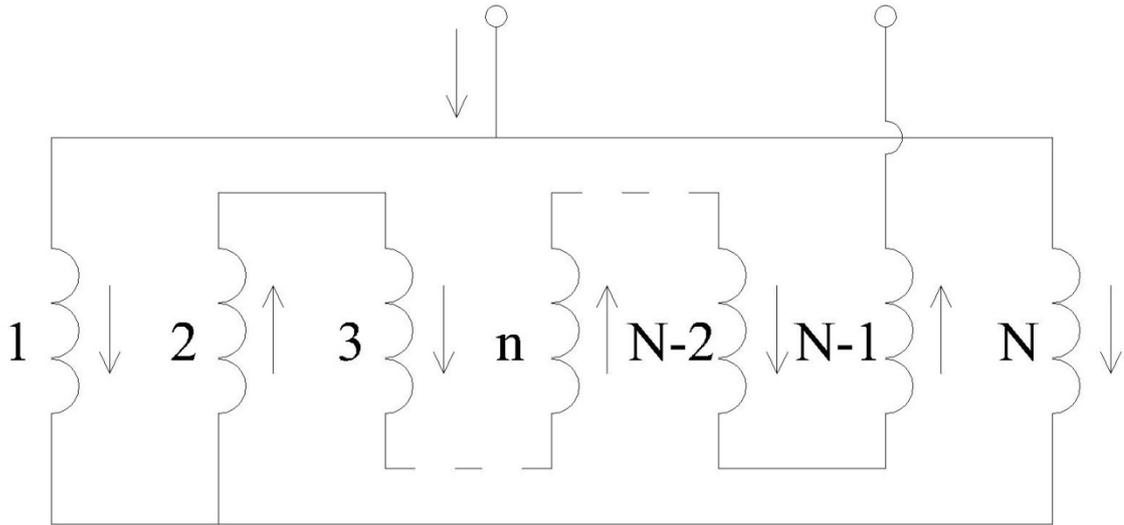


Рис. 2.3. Электрическая схема соединения секций внутри СОТ

В противном случае надо считать трехмерное распределение магнитного поля.

### II. Расчет характеристик токоограничителя.

Распределение локального магнитного поля по сечению сверхпроводника описывается уравнением:

$$\operatorname{rot} B = \mu_0 \cdot j_C, \quad (2.7)$$

которое в цилиндрической системе координат, с учетом модели критического состояния, принимает вид:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d}{d\rho} (\rho \cdot B) = \mu_0 \cdot \frac{\alpha}{|B|^\gamma}. \quad (2.8)$$

Решая (2), получим:

$$B_n(\rho) = \frac{\operatorname{sgn}(A_n)}{\rho} \cdot \gamma + 1 \sqrt[\gamma]{|A_n|}, \quad (2.9)$$

$$A_n = (r_n \cdot B(r_n))^{\gamma+1} + \operatorname{sgn}(J_n) \cdot \frac{\gamma+1}{\gamma+2} \cdot \mu_0 \cdot \alpha \cdot (\rho^{\gamma+2} - r_n^{\gamma+2}). \quad (2.10)$$

Здесь  $B_n(\rho)$  - поле секции  $n$  в точке сверхпроводника с текущей координатой  $\rho$ ,  $B(r_n)$ - поле на внутреннем радиусе секции  $n$ ,  $\text{sgn}(J_n)$ - функция знака тока в секции  $n$   $\text{sgn}(J_n) = 1$  при  $J_n \geq 0$  и  $\text{sgn}(J_n) = -1$  при  $J_n < 0$ ,  $\text{sgn}(A_n)$  - функция знака  $A_n$ . Значение  $B(r_n)$  рассчитывается из закона полного тока, примененного к секциям, внутренним по отношению к рассчитываемой:

$$B(r_n) = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi \cdot r_n} \cdot \sum_{k=1}^{n-1} J_k. \quad (2.11)$$

Расчет по (2.9-2.11) начинается с внутренней секции, для которой значения внутреннего и внешнего радиусов задаются как аргументы, а  $B(r_1) = 0$ . Ток секции 1 рассчитывается по значению магнитного поля на её внешнем радиусе:

$$J_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{\mu_0} \cdot B(R_1). \quad (2.12)$$

Этих данных достаточно для определения начальной величины поля в следующей секции по (2.11) и, следовательно, для расчета распределения поля в ней по (2.9), (2.10). Расчет следующих секций выполняется аналогично с учетом особенностей описанных ниже:

а) При  $n \neq 1$  для расчета тока секции вместо (2.12) используется более общее соотношение, которое также следует из закона полного тока:

$$J_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_n}{\mu_0} \cdot \left[ B(R_n) - B(r_n) \right] + \frac{R_n - r_n}{r_n} \cdot \sum_{k=1}^{n-1} J_k. \quad (2.13)$$

б) Значения внешних радиусов секций с номерами от  $n = 2$  до  $n = N-1$  подбираются в процессе расчета из условия  $J_n = (-1)^{n+1} \cdot 2 \cdot J_1$ .

с) Ток последней секции должен быть равен  $J_N = J_1$ .

Условие (b) обеспечивает минимизацию значения среднего магнитного поля в секции и, следовательно – максимум средней критической плотности тока. Условие (c) позволяет получить значение индукции магнитного поля на внешней границе СОТ  $B(R_N) = 0$ .

### Результаты расчетов

Общий характер зависимости экономии сверхпроводника СОТ от числа секций  $N$  и параметра  $\gamma$  представлен на рис. 2.4(а,б). На оси ординат отложен параметр  $G$ , характеризующий отношение объемов сверхпроводника  $V_N/V_3$ , где  $V_3$  – базовый вариант СОТ, состоящий из трёх параллельно-последовательных секций. Соответственно, при расчетах параметры  $\alpha$  и  $K_{OГР}$  полагались постоянными для любого  $N$  и  $\gamma$ .

Рис. 2.4а показывает влияние секционирования на экономию сверхпроводника для  $N = 1 \div 3$ .

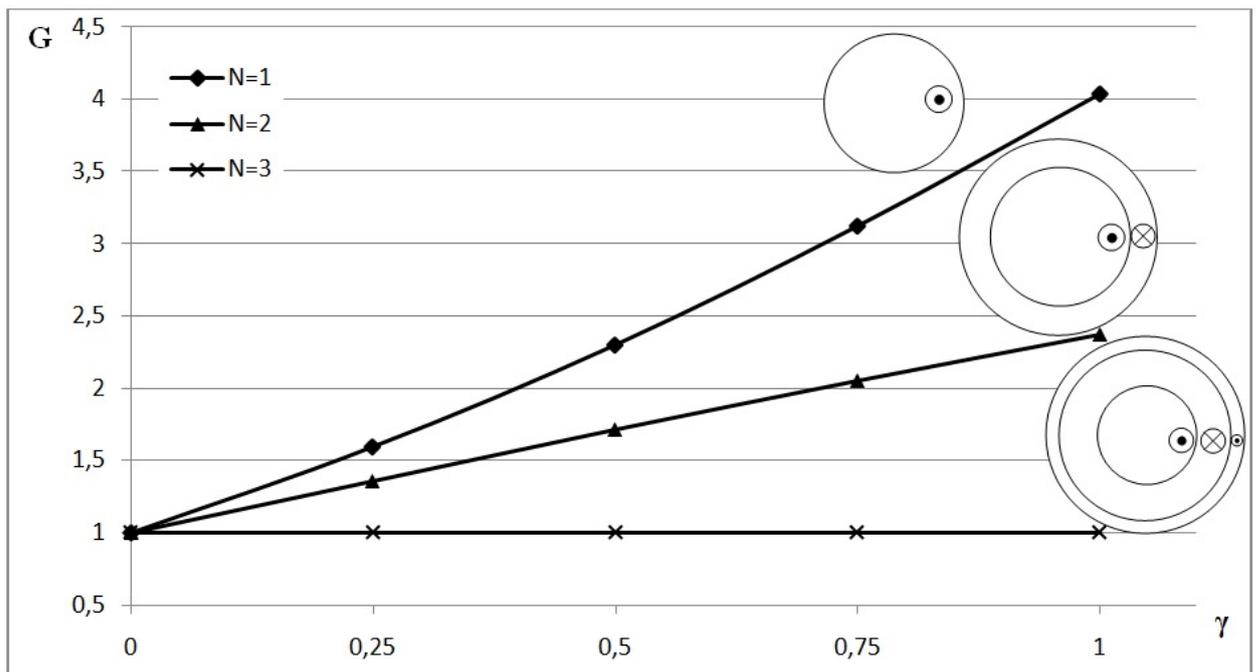


Рис. 2.4а. Сравнение количества сверхпроводника для СОТ при варьировании количества секций  $N$  от 1 до 3. На вставке показаны конструкции СОТ.

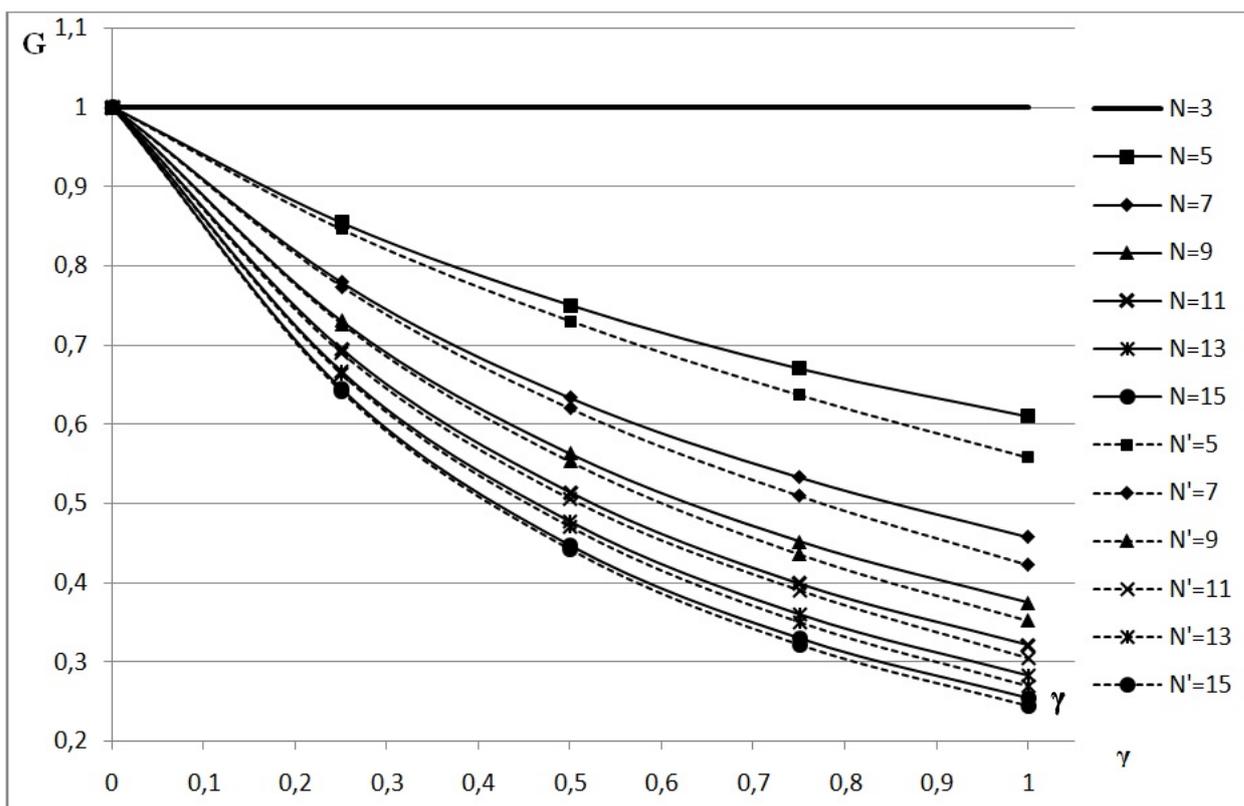


Рис. 2.46. Сравнение расхода сверхпроводника для СОТ при количестве секций  $N=3 \div 15$ .

Варианты для большего количества секций проанализированы на рис.2.46. Здесь, сплошными линиями представлены результаты расчетов для секций вплотную примыкающих друг к другу ( $R_n = r_{n+1}$ ), пунктирными – расчеты, выполненные с учетом зазора между секциями, необходимого для электроизоляции.

Как показывают расчёты, увеличение количества секций СОТ приводит к снижению необходимого количества сверхпроводника.

На рис. 2.5 приведены примеры распределения магнитного поля по сечению сверхпроводящего ограничителя тока для двух вариантов: секции без зазора, и секции с зазором. Как видно, наличие зазора для электрической изоляции не приводит к существенному изменению распределения магнитного поля, следовательно, для дальнейших расчетов влиянием зазора можно пренебречь.

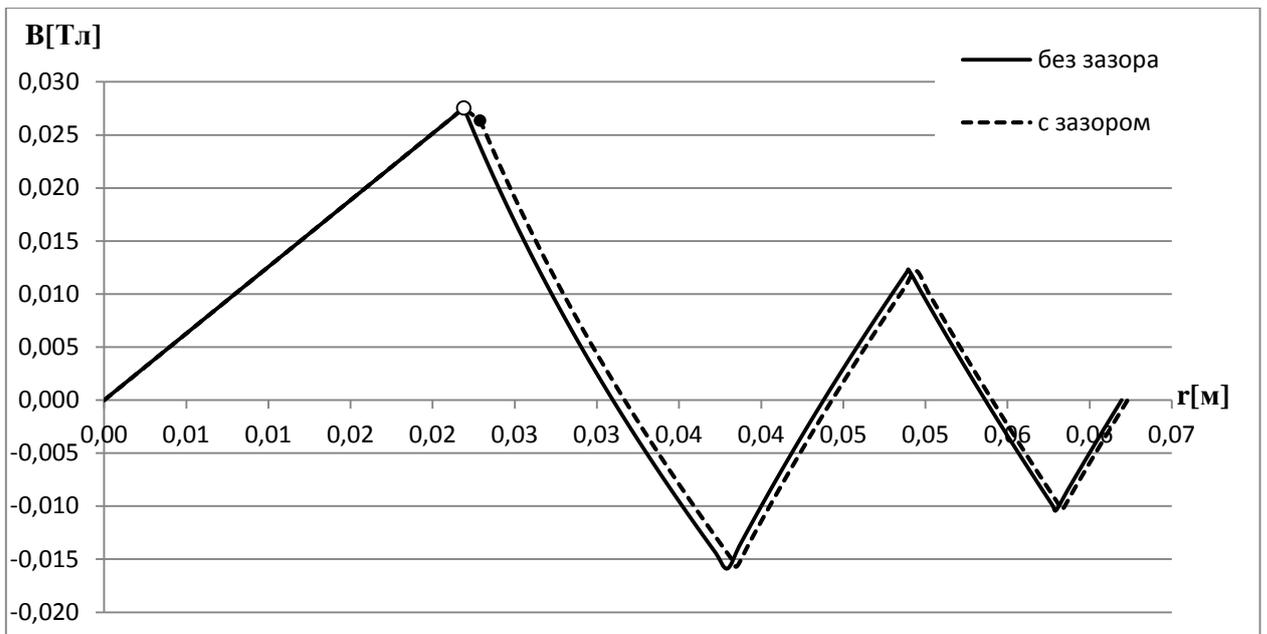


Рис. 2.5. Распределение магнитного поля по сечению сверхпроводника для  $N = 5, \gamma=0$ ;  $\circ$  – внутренний радиус зазора,  $\bullet$  – внешний радиус зазора.

## 2.2 Методика расчета гистерезисных потерь.

Характер проникновения тока в сверхпроводник на данный момент достаточно хорошо изучен [37, 52, 53, 85]. Если представить униполярный сверхпроводящий кабель в качестве цилиндра с одинаковыми свойствами по всему сечению, то видно, что ток в данном случае будет проникать от его поверхности к центру, как показано на рисунке 2.6.

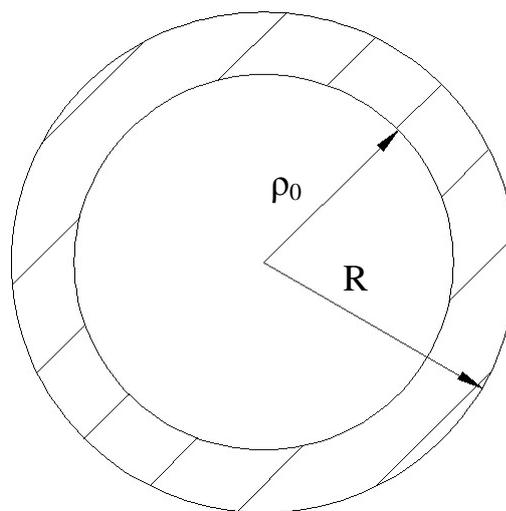


Рис. 2.6. Проникновение тока внутрь цилиндрического сверхпроводника.  $R$  – внешний радиус цилиндра,  $\rho_0$  – радиус проникновения тока.

Согласно закону полного тока:

$$\operatorname{rot} B = \mu_0 \cdot j_c, \quad (2.13)$$

где  $j = \frac{\alpha}{|B|^\gamma}$  – зависимость плотности тока от индукции магнитного поля в сверхпроводнике.

Так как мы рассматриваем систему, в которой длина конструкции много больше ее радиуса поперечного сечения, то решать мы её можем относительно плоскости её поперечного сечения. Тогда величина магнитного поля в точке  $\rho_0 \leq \rho \leq R$  будет выражаться дифференциальным уравнением:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d}{d\rho} (B \cdot \rho) = \mu_0 \cdot \frac{\alpha}{|B|^\gamma}, \quad (2.14)$$

Решая данное уравнение, получим выражение для величины поля в точке  $\rho$ :

$$B = \left[ \mu_0 \cdot \alpha \cdot \operatorname{sgn}(B) \cdot \frac{\gamma+1}{\gamma+2} \cdot \left( \rho - \frac{\rho_0^{\gamma+2}}{\rho^\gamma} \right) \right]^{\frac{1}{\gamma+1}}, \quad (2.15)$$

где  $\operatorname{sgn}(B)$  – функция знака (направления) магнитного поля в секции.

Из уравнения (2.15), с учетом  $|B_R| = \frac{\mu_0 \cdot |J|}{2 \cdot \pi \cdot R}$  легко выразить  $\rho_0$ :

$$\rho_0^{\gamma+2} = \left[ R^{\gamma+2} - \frac{\gamma+1}{\gamma+2} \cdot \frac{|B_R|^{\gamma+1}}{\mu_0 \cdot \alpha \cdot R} \cdot R^{\gamma+2} \right], \quad (2.16)$$

Тогда зависимость глубины проникновения тока от его величины, с учетом обезразмеривания ( $\rho_0^* = \frac{\rho_0}{R}$ ), будет выражаться следующим уравнением:

$$\rho_0^* = \left[ 1 - \frac{\gamma+2}{\gamma+1} \cdot \frac{1}{\mu_0 \cdot \alpha \cdot R} \cdot \left( \frac{\mu_0 \cdot J}{2 \cdot \pi \cdot R} \right)^{\gamma+1} \right]^{\frac{1}{\gamma+2}}. \quad (2.17)$$

### Принцип расчета потерь.

Удельные гистерезисные потери, возникающие в сверхпроводнике, за время равное  $\frac{1}{4}$  периода колебания тока можно вычислить по формуле:

$$\frac{Q}{l} = \int_0^t \left[ \int_{\rho_0}^R 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot d\rho \cdot E(\rho) \cdot j(\rho) \right] \cdot dt \quad (2.18)$$

Для расчета  $E$  в выделенном контуре (рисунок 2.7) используем уравнение Максвелла:

$$\oint E \cdot dl = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.19)$$

Направление обхода контура не важно, так как произведение  $E \cdot j > 0$  всегда, для токов насыщенной зоны (в ненасыщенной зоне потерь нет).

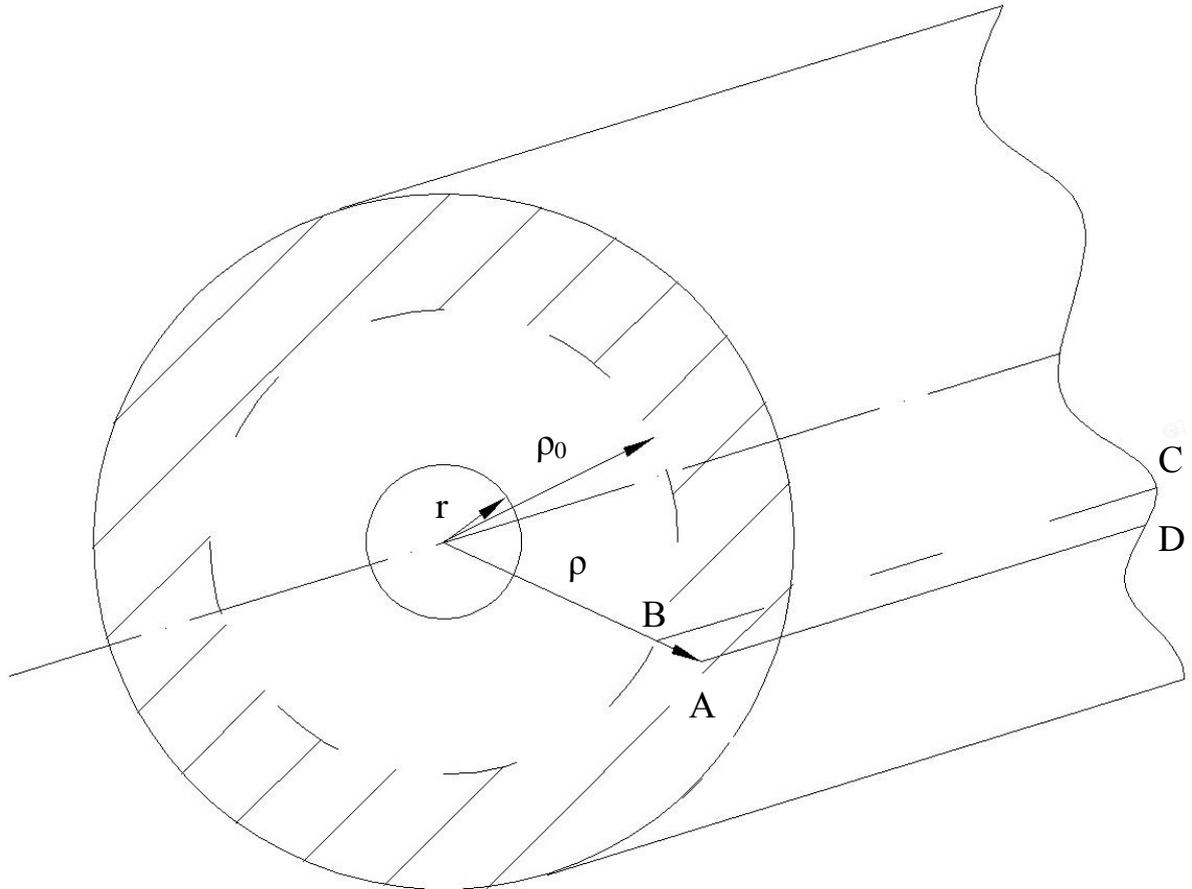


Рис.2.7. Контур в цилиндрическом кабеле для расчёта  $E$

В каждой точке проводника  $E$  равно сумме постоянной и вихревой составляющих. На линии  $E=0$  эти составляющие компенсируют друг друга, следовательно, если в проводнике есть линия  $E=0$ , то уравнение (2.19), записанное для контура, включающего эту линию даёт полное значение  $E$ .

Поскольку  $\Phi(\rho) = l \int_{\rho_0}^{\rho} B \cdot d\rho$ , то уравнение (2.19) примет вид:

$$E = \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{dB}{dt} d\rho. \quad (2.20)$$

Из уравнения

$$\frac{dB}{dt} = -\frac{\mu_0 \alpha}{|B|^\gamma} \cdot \frac{\rho_0^{\gamma+1}}{\rho^{\gamma+1}} \cdot \frac{d\rho_0}{dt}, \quad (2.21)$$

видим, что от времени  $t$  зависит только  $\rho_0$ . Эту зависимость можно выразить уравнением:

$$\frac{d\rho_0}{dt} = -\left(\frac{R}{\rho_0} \cdot \frac{\mu_0}{2\pi}\right)^{\gamma+1} \cdot \frac{J^\gamma}{\mu_0 \alpha} \cdot \frac{dJ}{dt}, \quad (2.22)$$

тогда уравнение (2.19) примет вид:

$$E_\rho = \frac{dJ}{dt} \cdot \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{\mu_0 \cdot \alpha}{|B|^\gamma} \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{\gamma+1} \cdot \left(\frac{R}{\rho_0} \cdot \frac{\mu_0}{2\pi}\right)^{\gamma+1} \cdot \frac{J^\gamma}{\mu_0 \cdot \alpha} \cdot d\rho. \quad (2.23)$$

В заданный момент времени от  $\rho$  зависит только абсолютное значение магнитной индукции  $|B|$ . Нижний предел интегрирования  $\rho_0$  определяется значением протекающего по цилиндрическому проводнику тока  $J$ . Поэтому, в заданный момент времени, напряженность электрического поля в точке  $\rho$  равна:

$$E_\rho = \frac{dJ}{dt} \cdot \left(\frac{\mu_0}{2\pi}\right)^{\gamma+1} \cdot |J|^\gamma \cdot \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{R \cdot d\rho}{\rho \cdot |B_\rho \cdot \rho|^\gamma} R^\gamma. \quad (2.24)$$

Таким образом получаем, что мощность потерь в точке  $\rho_T$  ( $\rho_0 < \rho_T < R$ ) при заданных значениях  $J$  и  $dJ/dt$  ( $|J| < J_C$ ) равна:

$$P_{\rho_T} = |E_{\rho_T}| \cdot |j_{\rho_T}|, \quad (2.25)$$

$$P_{\rho_T} = \frac{\alpha}{|B_{\rho_T}|^\gamma} \cdot \left(\frac{\mu_0}{2\pi}\right)^{\gamma+1} \cdot |J|^\gamma \cdot \left|\frac{dJ}{dt}\right| \cdot R \cdot \int_{\rho_0^*}^{\rho_T^*} \frac{d\rho^*}{\rho^* \cdot |B_{\rho^*} \cdot \rho^*|^\gamma}, \quad (2.26)$$

где:  $\rho^* = \frac{\rho}{R}$ ,  $B_\rho$  – текущее значение поля в точке  $\rho^*$ ,  $B_{\rho_T}$  – значение поля в точке  $\rho = \rho_T$ . Также:

$$|B|^\gamma = \left(\frac{\gamma+1}{\gamma+2} \cdot \mu_0 \alpha \cdot R \cdot \rho^* \cdot \left(1 - \left(\frac{\rho_0^*}{\rho^*}\right)^{\gamma+2}\right)\right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}}, \quad (2.27)$$

где:  $\rho_0^*$  выражается формулой (2.17).

Для определения критических величин (критического тока  $J_C$ , и магнитного поля  $B_C$  при этом критическом токе на поверхности цилиндра (или кольца) радиуса  $R$ ) используются следующие выражения:

для сплошного цилиндра

$$|J_C| = \frac{2\pi R}{\mu_0} \cdot \left( \frac{\gamma+1}{\gamma+2} \cdot \mu_0 \cdot \alpha \cdot R \right)^{\frac{1}{\gamma+1}}, \quad (2.28)$$

в случае кольца с внутренним радиусом  $r$

$$|J_C| = \frac{2\pi R}{\mu_0} \cdot \left( \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\gamma+2} \right) \cdot \frac{\gamma+1}{\gamma+2} \cdot \mu_0 \alpha R \right)^{\frac{1}{\gamma+1}}. \quad (2.29)$$

В общем случае для кольца и для сплошного цилиндра получим выражение

$$J_{CK} = \frac{2\pi R}{\mu_0} \left( \left( 1 - r^{*\gamma+2} \right) \cdot \frac{\gamma+1}{\gamma+2} \cdot \mu_0 \alpha R \right)^{\frac{1}{\gamma+1}}, \quad (2.30)$$

где  $r^* = \frac{r}{R}$  – безразмерный внутренний радиус радиус.

Магнитное поле на поверхности цилиндра при токе  $J=J_C$ :

$$B_C = \left( \frac{\gamma+1}{\gamma+2} \cdot \mu_0 \alpha R \right)^{\frac{1}{\gamma+1}}, \quad (2.31)$$

для сплошного кольца это уравнение примет вид (выражая поле кольца через поле сплошного цилиндра такого же внешнего радиуса)

$$B_{CK} = B_C \cdot \left( 1 - r^{*\gamma+2} \right)^{\frac{1}{\gamma+1}}. \quad (2.32)$$

Итак, разделив числитель и знаменатель в выражении для глубины проникновения тока  $\rho_0^*$

$$\rho_0^* = \left( 1 - \left( \frac{\mu_0 J}{2\pi R B_C} \right)^{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{\gamma+2}} \quad (2.33)$$

на  $J_C$  получим:

$$\rho_0^* = \left( 1 - \left( \frac{\mu_0 J / J_C}{2\pi R / B_C} \right)^{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{\gamma+2}}, \quad (2.34)$$

а с учетом того, что  $B_C = \frac{\mu_0 J_C}{2\pi R}$  выражение (2.34) примет вид:

$$\rho_0^* = (1 - J^{*\gamma+1})^{\frac{1}{\gamma+2}}. \quad (2.35)$$

Уравнение для поля в точке с координатой  $\rho$ , выраженного в относительных координатах (безразмерном виде), будет выглядеть следующим образом:

$$B^* = \left(\rho^* - \frac{1 - J^{*\gamma+1}}{\rho^{*\gamma+1}}\right)^{\frac{1}{\gamma+1}}. \quad (2.36)$$

Тогда напряженность электрического поля в текущей точке  $\rho$  будет выражаться в относительных единицах уравнением:

$$E_{\rho_T} = B_C \cdot R \cdot \frac{d}{dt} \int_{\rho_0^*}^{\rho_T^*} \left(\rho^* - \frac{1 - J^{*\gamma+1}}{\rho^{*\gamma+1}}\right)^{\frac{1}{\gamma+1}} \cdot d\rho^*, \quad (2.37)$$

или после упрощения:

$$E_{\rho_T} = B_C \cdot R \cdot J^{*\gamma} \cdot \frac{dJ^*}{dt} \cdot \int_{\rho_0^*}^{\rho_T^*} \frac{d\rho^*}{B^{*\gamma} \cdot \rho^{*\gamma+1}}. \quad (2.38)$$

Для упрощения расчетов введем величину  $E_{\rho_T}^* = \frac{E_{\rho_T}}{B_C \cdot R}$ .

Тогда мощность потерь в текущей точке  $\rho$  будет выражаться формулой:

$$P_{\rho_T} = \frac{\gamma+2}{\gamma+1} \cdot \frac{B_C^2}{\mu_0} \cdot \frac{E_{\rho_T}^*}{B_{\rho_T}^{*\gamma}}. \quad (2.39)$$

Чтобы получить мощность потерь в полном объеме, необходимо проинтегрировать результат по объему цилиндра (кольца), тогда мощность потерь в расчете на единицу длины цилиндра (или кольца) будет равна:

$$\frac{P}{l} = \frac{\gamma+2}{\gamma+1} \cdot \frac{2\pi}{\mu_0} \cdot B_C^2 \cdot R^2 \cdot \int_{\rho_0^*}^1 \frac{E_{\rho_T}^*}{B_{\rho_T}^{*\gamma}} \cdot \rho_T^* \cdot d\rho_T^*. \quad (2.40)$$

Для расчета потерь достаточно проинтегрировать формулу (2.40) по времени (dt). При этом множитель  $\frac{dJ^*}{dt}$  (см. формулу (2.38)) сокращается с dt и остаётся дифференциал  $dJ^*$ . Исходя из этого, потери на единицу длины сверхпроводящей цилиндрической конструкции равны:

$$\frac{Q}{l} = \frac{\gamma+2}{\gamma+1} \cdot \frac{2\pi}{\mu_0} B_C^2 \cdot R^2 \int_0^{J^*} J^{*\gamma} \cdot \left(\int_{\rho_0^*}^1 \frac{\rho_T}{B_{\rho_T}^{*\gamma}} \cdot \left(\int_{\rho_0^*}^{\rho_T^*} \frac{d\rho^*}{B^{*\gamma} \cdot \rho^{*\gamma+1}}\right) d\rho_T^*\right) dJ^*, \quad (2.41)$$

где размерный коэффициент можно выразить и через критический ток:

$$\frac{\gamma+2}{\gamma+1} \cdot \frac{2\pi}{\mu_0} \cdot B_C^2 \cdot R^2 = \frac{\gamma+2}{\gamma+1} \cdot \frac{\mu_0 J_C^2}{2\pi}. \quad (2.42)$$

В частном случае, когда  $\gamma=0$ , формула (2.41) в аналитическом виде, с учетом (2.30) будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{Q}{l} = \frac{\mu_0 J_C^2}{4\pi} \cdot \left( (1 - J^*) \cdot \ln(1 - J^*) + J^* - \frac{J^{*2}}{2} \right). \quad (2.43)$$

### 2.3 Расчет гистерезисных потерь в секционированном токоограничителе

Рассмотрим характер проникновения тока в секции (внутри) секционированного токоограничителя на примере конструкции состоящей из трех секций (см. рисунок 2.8). При расчете геометрии данной конструкции принималось:  $\gamma=0,25$ , ток срабатывания токоограничителя  $J_C=6$  кА.

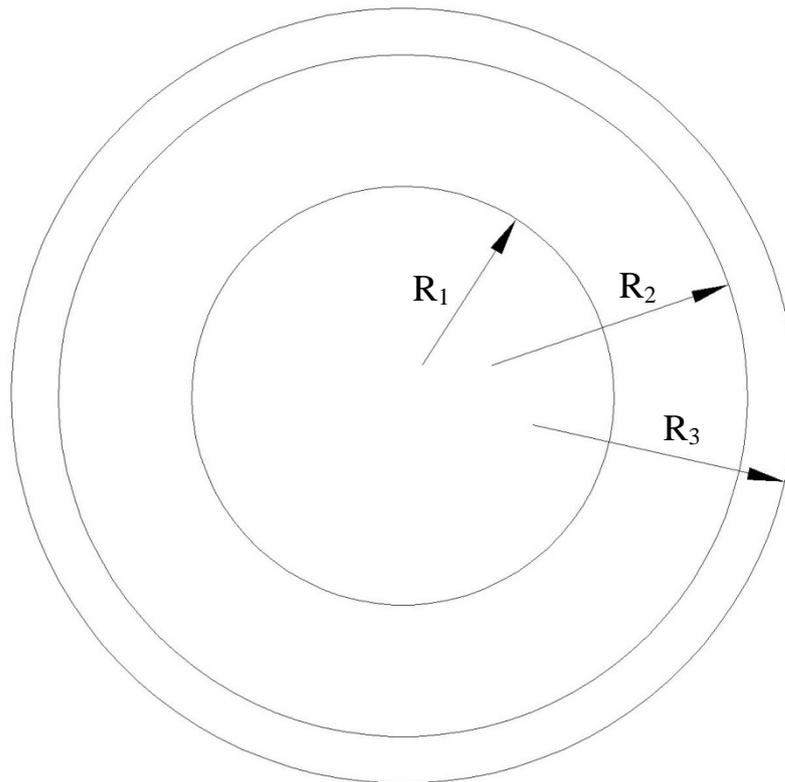


Рис.2.8. Геометрия трехсекционного токоограничителя.

Как видно из рисунка 2.3 внешняя и внутренняя секции соединены параллельно, при этом при увеличении тока от 0 до  $J_C$  (где  $J_C$  – ток срабатывания токоограничителя) насыщение секций происходит следующим

образом: ток во внешнюю секцию проникает от её внутренней границы, а в секцию номер 2 от её внешней, как показано на рисунке 2.9.

При достижении значения тока равного  $J_C/2$  ток начинает проникать во внутреннюю секцию №1 (поскольку внешняя секция №3 оказалась полностью заполнена током) и насыщать её от внешней границы, насыщение секции №2 от её внешней границы прекращается, следовательно, секция №2 начинает насыщаться изнутри (то есть от границы между секциями №1 и №2), как показано на рисунке 2.10.

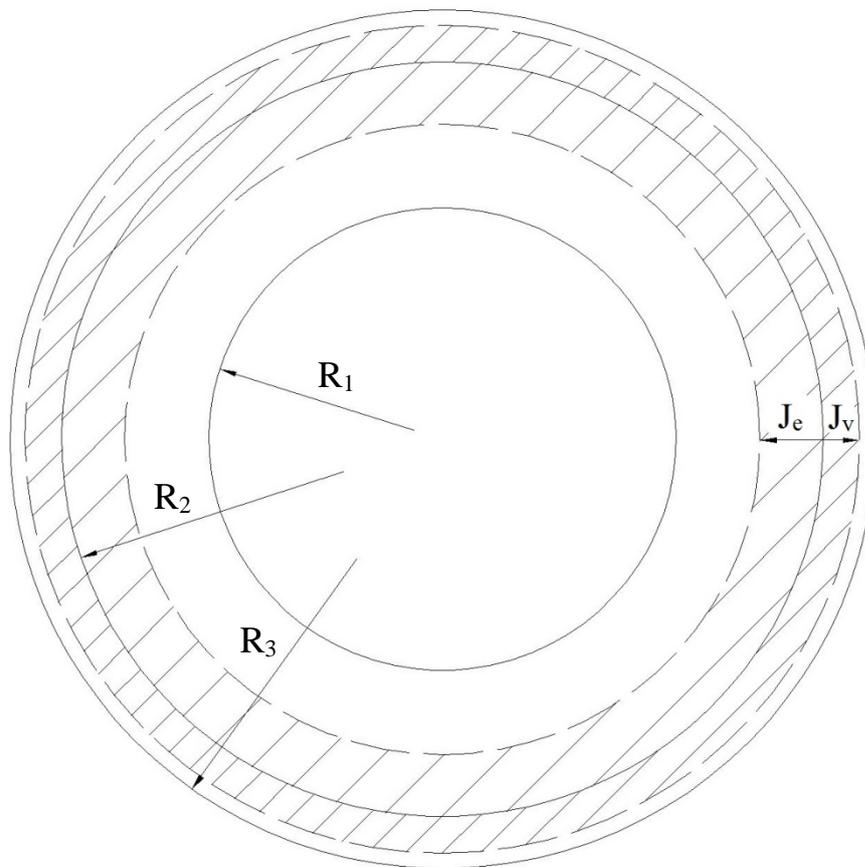


Рис. 2.9.  $J_v$  – ток, проникающий с внутренней границы секции;  $J_e$  – ток, проникающей с внешней стороны секции

При этом формула (2.41) с учетом (2.42) для численного расчета потерь при проникновении тока снаружи секции будет иметь вид:

$$\frac{Q}{l} = \frac{\gamma+2}{\gamma+1} \cdot \frac{\mu_0 J_C^2}{2\pi} \cdot \int_0^{J^*} J^{*\gamma} \cdot \left( \int_{\rho_0^*}^1 \frac{\rho_T}{y^*} \cdot \left( \int_{\rho_0^*}^{\rho_T^*} \frac{\rho^* d\rho^*}{y^*} \right) d\rho_T^* \right) dJ^*, \quad (2.44)$$

где  $y^* = (\rho^{*\gamma+2} - \rho_0^{\gamma+2})^{\frac{\gamma}{\gamma+1}}$ .

В случае конструкции токоограничителя, состоящего более чем из трёх секций, внутренняя секция 1 и внешняя секция N будут насыщаться по описанному выше варианту. Секции 2 ÷ N-1 будут насыщаться одновременно, при этом, до полного насыщения секции N, четные секции насыщаются от их внешней границы, а нечетные – от внутренней. После насыщения секции N начинает насыщаться секция 1, для всех остальных секций характер насыщения меняется на противоположный.

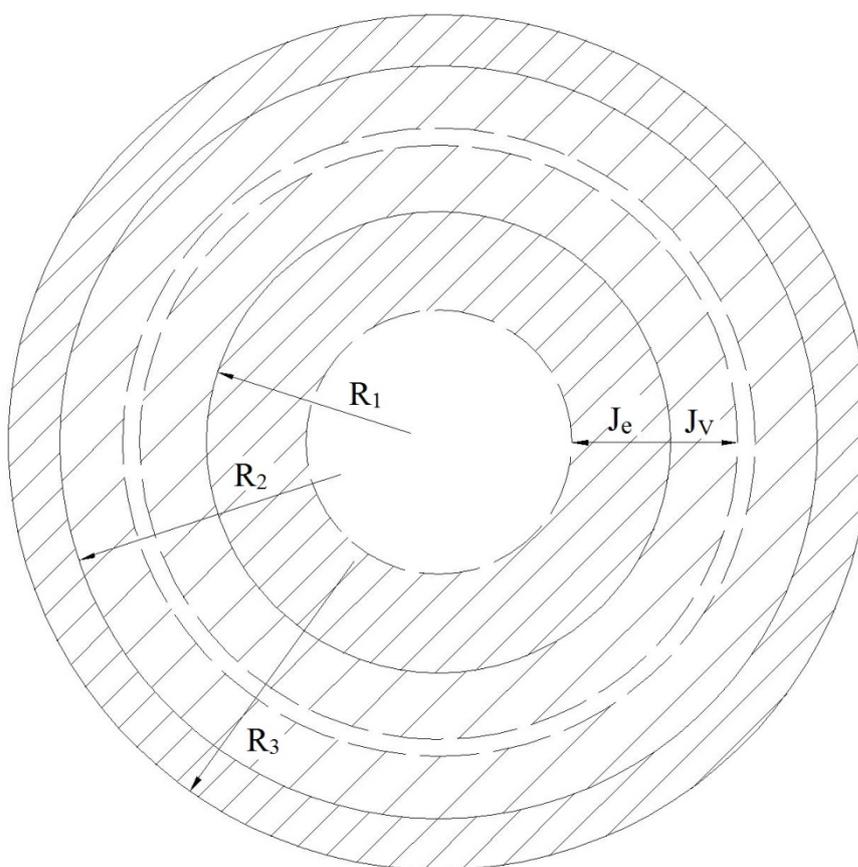


Рис. 2.10. Характер проникновения тока в первую и вторую секции после насыщение крайней (третьей секции).

Все выведенные соотношения для расчета величины удельных потерь справедливы для расчета потерь в фазе первоначального проникновения. Результат для циклического изменения тока более громоздок, главным образом, из-за более сложного расчета  $\rho_0$ . Поэтому, использование его для

практических расчетов нецелесообразно. Удобнее воспользоваться равенством:

$$Q_C = 4 \cdot Q_0, \quad (2.45)$$

где  $Q_C$  – потери в циклическом процессе (в расчете на один цикл),  $Q_0$  – потери в фазе первоначального проникновения этого цикла (то есть, при изменении тока от 0 до первого экстремального значения). При  $\gamma=0$  это соотношение является аналитически точным. При иных значениях  $\gamma$  – приближенным. Однако, соответствующая погрешность мала и для практики не существенна.

## 2.4 Результаты расчетов

Обобщенные результаты проведенной серии оптимизационных расчетов представлены на рисунке 2.11. На рисунке даны отношения удельных потерь оптимизированных конструкций секционированного токоограничителя к характеристикам эквивалентного цилиндрического ограничителя, состоящего из одной секции. Для каждого варианта расчета, в качестве эквивалентного принимался цилиндрический ограничитель, состоящий из одной секции, рассчитанный на те же значения номинального тока  $J_{СК}$  и сопротивления в несверхпроводящем состоянии. То есть, принимались одинаковыми характеристики, определяемые исходными данными на конкретный токоограничитель. Естественно, что одинаковыми принимались и свойства материала – коэффициенты  $\alpha$  и  $\gamma$ . Как видим, благодаря использованию секционированного токоограничителя возможно достичь (в зависимости от свойств сверхпроводника и количества секций), экономии расхода сверхпроводящего материала до 1000% (см.рис. 2.4а и рис.2.4б), и снижения величины гистерезисных потерь более чем на порядок. Эффект возрастает с увеличением количества секций. Однако соответствующие зависимости имеют тенденцию к насыщению. Поэтому,

представляется целесообразным ограничивать степень секционирования пятью- семью секциями.

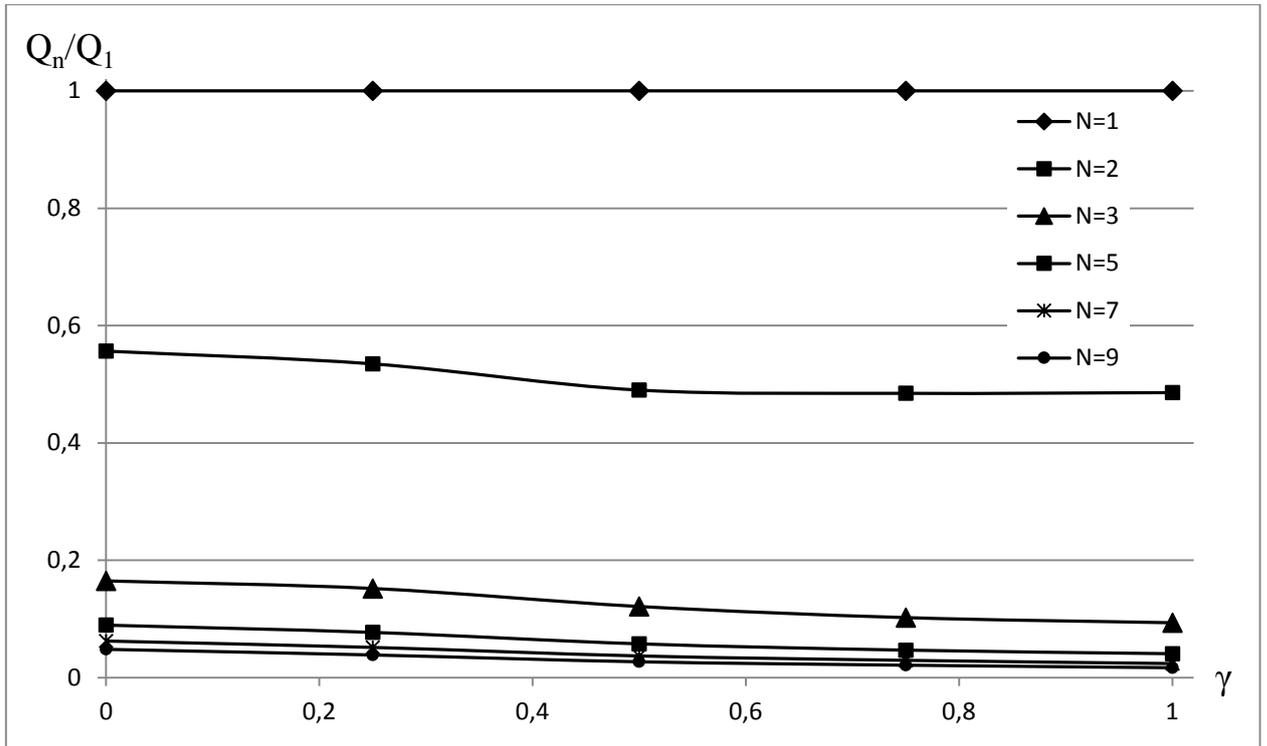


Рис. 2.11. Отношение гистерезисных потерь в оптимизированном секционированном токоограничителе к потерям в соответствующем эквивалентном односекционном цилиндрическом токоограничителе. Режим работы сети – номинальный.

### Выводы по главе 2:

1. Разработана методика расчета характеристик сверхпроводящего резистивного токоограничителя, предложены варианты конструкции секционированного СОТ;
2. Разработана методика расчёта гистерезисных потерь при номинальном режиме работы сети для различных конструкций сверхпроводящих резистивных токоограничителей;
3. Показано, что использование секционирования обеспечивает существенную экономию сверхпроводящего материала (в сравнении с несекционированным СОТ);

4. Кроме того, секционирование позволило значительно снизить гистерезисные потери в сверхпроводящем резистивном токоограничителе при номинальном (не аварийном) режиме работы;
5. Дополнительным преимуществом представленных конструкций является их компактность и экологическая чистота (отсутствие внешних магнитных полей).

### 3. Сверхпроводящие токоограничители индуктивного типа.

В цепях переменного тока быстрого ограничения тока можно достичь за счет введения в цепь большого индуктивного сопротивления  $x_B$ . На рис. 3.1 показана принципиальная схема с выключателем  $B$ , имеющим переменное индуктивное сопротивление  $x_B(t)$ , вводимое в процессе отключения цепи, и промежуток  $\Pi$ , необходимый для разрыва остаточного тока в цепи. Последний, в пренебрежении собственным сопротивлением цепи при КЗ, равен:

$$I_{ост} \approx U_{и} / x_{Bмакс}, \quad (1)$$

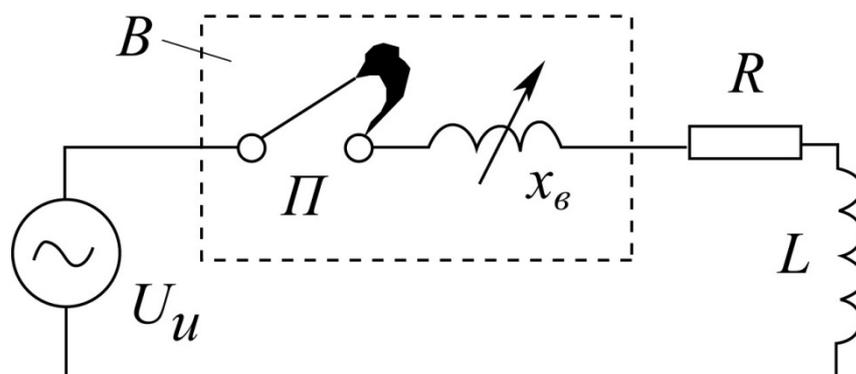


Рис. 3.1. Выключатель с токоограничивающим индуктивным сопротивлением

Быстропеременное индуктивное сопротивление в цепях переменного тока может быть получено различными путями, например, при помощи реактора с перемещающимся сердечником. Наиболее совершенными способами быстрого изменения индуктивного сопротивления следует считать использование реактора с подмагничиванием, дросселя насыщения или трансформатора.

Происходящее в последнее время бурное развитие технологии высокотемпературных сверхпроводников поставило на повестку дня вопрос о создании принципиально нового класса токоограничивающих устройств. В

этих устройствах используются различные ВТСП элементы [38,73,94]: кольца, цилиндры, провода и т.д.

Одним из главных недостатков этих устройств является высокая стоимость сверхпроводящих материалов. В связи с этим, большое значение при разработке сверхпроводящих обмоток приобретает вопрос выбора рациональной геометрии, обеспечивающей наименьший удельный расход сверхпроводника.

### **3.1 Секционирование сверхпроводящих токоограничивающих устройств трансформаторного типа.**

Известно, что полный магнитный поток, пронизывающий замкнутый безрезисторный (сверхпроводящий) контур, остаётся постоянным до тех пор, пока сопротивление контура равно нулю. При изменении существующего магнитного поля в таком контуре индуцируется ЭДС, создается ток и магнитный поток, в точности компенсирующий изменение магнитного потока исходного поля. Управление потокораспределением может быть выполнено путем коммутации электромагнитных экранов, изготовленных на основе замкнутых сверхпроводящих колец, сопротивление которых меняется в результате разрушения сверхпроводимости.

Для таких устройств наиболее удачной является конструкция трансформатора с симметрично чередующейся обмоткой. Через первичную обмотку такого трансформатора протекает ограничиваемый ток, а вторичная обмотка замкнута накоротко и состоит из сверхпроводящих колец. В номинальном режиме работы импеданс токоограничивающего устройства является импедансом короткозамкнутого трансформатора и имеет низкое значение (линейный участок). При возникновении КЗ, ток в первичной обмотке токоограничивающего устройства возрастает (рис.3.2), что вызывает увеличение тока во вторичной обмотке, где происходит переход сверхпроводящих колец в нормальное состояние. При этом импеданс токоограничивающего устройства резко возрастает и принимает значение

импеданса трансформатора в режиме ХХ (нижние кривые на рис.3.2), за счёт чего и происходит ограничение тока КЗ в защищаемой цепи.

Рассмотрим экспериментальные данные, полученные в процессе изучения модели токоограничивающего устройства при различном количестве сверхпроводящих колец [39].

На рис.3.2 показано влияние количества сверхпроводящих колец на вольтамперную характеристику токоограничивающего устройства. Здесь сравниваются два токоограничивающих устройства с симметричными чередующимися обмотками. На вставке рис.3.2 рассмотрены 2 случая:

- а) обмотка – кольцо – обмотка (одна группа);
- б) обмотка – кольцо – обмотка, обмотка – кольцо – обмотка (все две группы).

Необходимо отметить, что размеры сверхпроводящих колец подобраны так, что количество сверхпроводящего материала в обоих случаях примерно одинаковое.

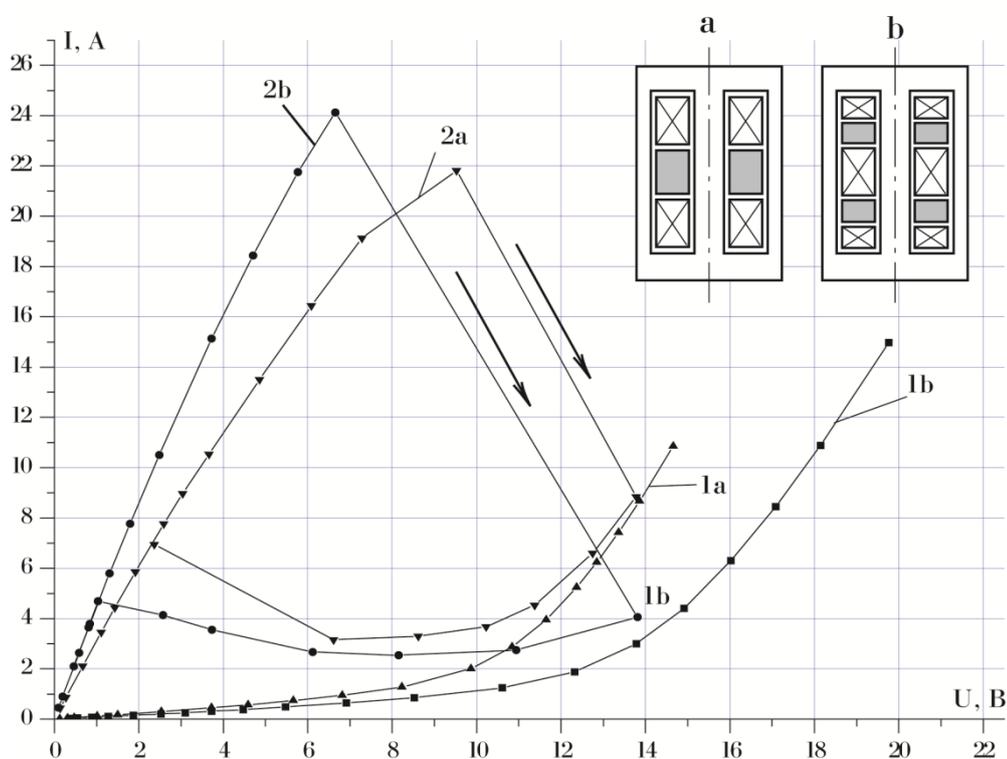


Рис. 3.2. Вольтамперная характеристика токоограничивающего устройства при различном количестве сверхпроводящих экранов (колец)

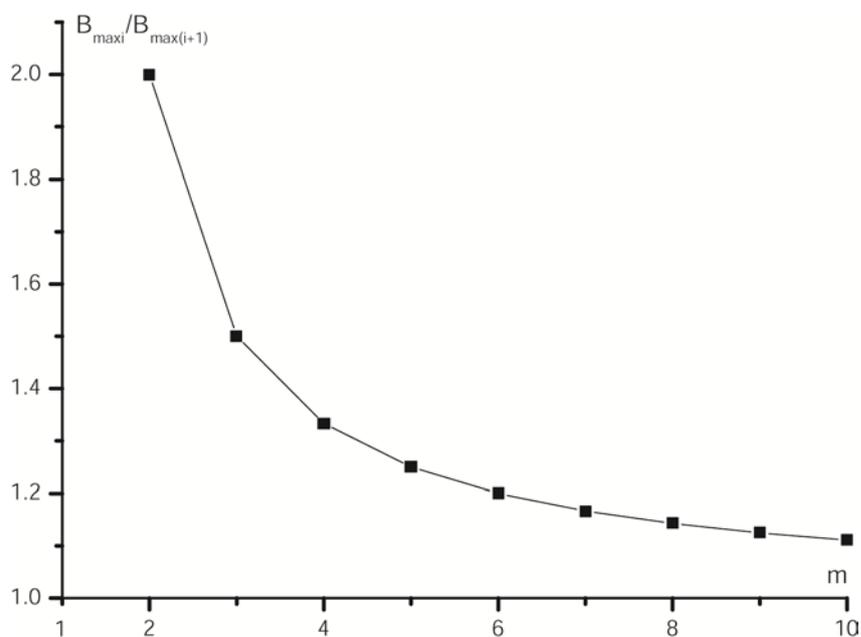


Рис. 3.3. Максимальная индукция магнитного поля для симметрично чередующейся обмотки при различном количестве экранов

На рис. 3.3 показана зависимость максимальной индукции магнитного поля от количества экранов для симметрично чередующейся обмотки. С увеличением количества сверхпроводящих экранов растёт их токонесущая способность, увеличивается степень ограничения, а также снижаются гистерезисные потери в сверхпроводящих экранах (кольцах). При этом индуктивность рассеяния слабо зависит от геометрических размеров колец и обмоток. Практически максимальное снижение индуктивности рассеяния достигается уже при числе групп, равном четырем.

Из рис.3.2 видно, что изменение импеданса токоограничивающего устройства, имеющего обмотку, состоящую из одной группы чередующихся обмоток, меньше (приблизительно в три раза), чем изменение импеданса устройства, имеющего обмотку, состоящую из двух групп чередующихся обмоток. Это является экспериментальным подтверждением увеличения кратности тока за счёт секционирования экрана [40].

## **3.2 Сравнение токоограничителей трансформаторного и автотрансформаторного типа.**

В устройствах трансформаторного и автотрансформаторного типа повышение индуктивности защищаемой электрической цепи также происходит благодаря затуханию тока во вторичной обмотке трансформатора [74,77,92,96]. Однако, последнее не является результатом перехода обмотки из сверхпроводящего состояния в нормальное, а обеспечивается размыканием этой обмотки с помощью быстродействующего выключателя. Поэтому, обмотки токоограничителей могут выполняться как из сверхпроводящих материалов, так и из обычных проводников. В данном разделе, методом численного моделирования, исследуются характеристики токоограничителей этого типа в зависимости от схемы подключения обмоток (автотрансформаторная схема и схема короткозамкнутого трансформатора), параметров быстродействующего выключателя и конструктивного исполнения обмоток. Будет показано, что наиболее эффективным способом улучшения весогабаритных характеристик токоограничителя является применение автотрансформаторной схемы совместно с быстродействующим выключателем взрывного действия. Будет рассмотрено два варианта исполнения обмоток: послойное и в виде набора замоноличенных в компаунде дисковых катушек. Последний представляется более технологичным в серийном производстве.

### **3.2.1 Виды быстродействующих выключателей**

Кроме аппаратов стандартной релейной защиты, время полного отключения аварийного участка которых около 200 мс (что составляет десять полных периодов колебания тока с частотой 50 Гц), в современных распределительных сетях используются быстродействующие выключатели (быстродействующие коммутационные аппараты) способные ограничивать

ток КЗ в течение первого полупериода его появления ( $\sim 10$  мс), а далее незамедлительно отключать его. К таким быстродействующим выключателям можно отнести: силовые токоограничивающие предохранители, вакуумные выключатели, ограничители ударного тока взрывного действия.

Токоограничивающие предохранители отличаются простотой конструкции и как следствие относительно небольшой стоимостью. Однако имеют ряд существенных недостатков: одноразовое действие, нестабильные токовременные характеристики, недостаточную эксплуатационную надежность, неуправляемость от внешних устройств, в частности от устройств внешней релейной защиты; трудность осуществления цикла автоматического повторного включения (АПВ) защищаемой цепи.

Один из наиболее совершенных вариантов быстродействующего вакуумного выключателя был разработан в ВЭИ на основе камеры КДВ-10-20/1000 [41]. Он рассчитан на напряжение 35 кВ. При возникновении КЗ система управления вырабатывает импульс управления на разведение контактов выключателя. Время полного отключения цепи для такого выключателя – не более 15 мс, что составляет менее одного периода промышленной частоты. Существенным достоинством такого выключателя является то, что на нем можно осуществить цикл АПВ. Время повторного включения составляет порядка 1,5 секунды. Недостатком данного выключателя является то, что время его срабатывания практически на порядок больше времени срабатывания токоограничивающих предохранителей или ограничителей ударного тока взрывного действия.

Ограничители ударного тока взрывного действия представляют собой сверхбыстродействующие управляемые коммутационные аппараты одноразового действия с относительно большим номинальным током. Конструктивно ограничитель ударного тока представляет собой герметизированный цилиндр, внутри которого располагается токонесущий проводник с вмонтированным в него пиропатроном. Сигнал на взрыв

пиропатрона подается от внешнего управляющего устройства. Последнее получает информацию о КЗ от измерительного органа, реагирующего на величину тока КЗ и его первую производную. Ограничение тока КЗ достигается за время порядка 0,5 мс. Полное время отключения цепи составляет примерно 5 мс, т.е.  $\frac{1}{4}$  периода промышленной частоты 50 Гц. Для исключения перенапряжений в сети при столь быстром отключении тока КЗ взрывной элемент ограничителя ударного тока шунтируется плавким предохранителем (плавкой вставкой) специальной конструкции.

Среди всех существующих типов выключателей ограничителя ударного тока взрывного действия обеспечивают наименьшее время отключения. Кроме того, по сравнению с токоограничивающими предохранителями, они имеют ряд дополнительных преимуществ: управляемость от внешних устройств, направленность действия, стабильность характеристик, повышенная эксплуатационная надежность, возможность осуществления пофазного и трехфазного отключения цепи. Поэтому, дальнейшие расчеты будут ориентированы на использование выключателей этого типа. Заметим также, что использование токоограничителя не исключает наличия в сети аппаратов стандартной релейной защиты со временем полного отключения не более 200 мс. Следовательно, номинальное время работы токоограничителя в аварийном режиме может быть ограничено интервалом менее 1 сек (согласно действующему Регламенту, окончательное отключение сети должно быть осуществлено уже после трех неудачных попыток повторного включения).

### 3.2.2 Методика расчета токоограничителей трансформаторного типа.

Принципиальная схема токоограничителя трансформаторного типа приведена на рис.3.4.

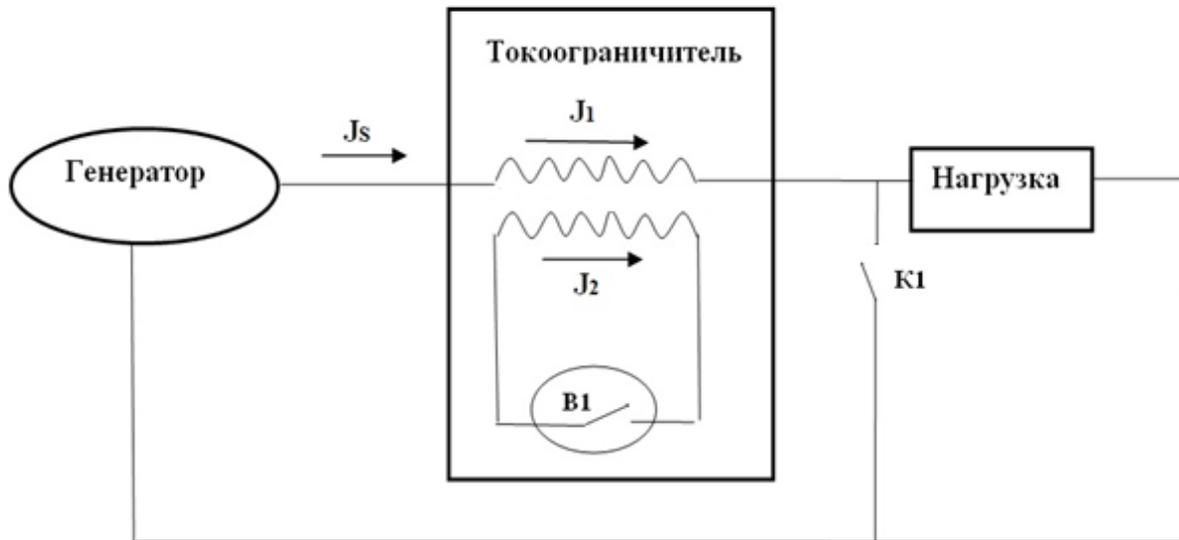


Рис.3.4. Схема включения токоограничителя трансформаторного типа.

Токоограничитель содержит две обмотки, индуктивно связанные, но не соединенные гальванически, – первичную, которая включена последовательно в защищаемую сеть и вторичную, замкнутую через выключатель В1. Ток первичной обмотки  $J_1$  равен току защищаемой сети  $J_s$ . Ток вторичной обмотки  $J_2$  наводится за счет ЭДС электромагнитной индукции, создаваемой первичной обмоткой. Зависимость токов от времени определяется системой уравнений:

$$L \cdot \frac{dJ_1}{dt} + M \cdot \frac{dJ_2}{dt} + R \cdot J_1 = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) , \quad (3.1)$$

$$L_2 \cdot \frac{dJ_2}{dt} + M \cdot \frac{dJ_1}{dt} + (R_2 + R_V) \cdot J_2 = 0 , \quad (3.2)$$

где  $L$  и  $R$  - индуктивность и активное сопротивление цепи первичной обмотки,  $L_2$  - индуктивность вторичной обмотки,  $M$  - взаимная индуктивность первичной и вторичной обмоток,  $R_2$  и  $R_V$  - соответственно активное сопротивление вторичной обмотки и выключателя,  $U_0$  - амплитуда

напряжения генератора,  $\varphi_0$  - фаза. За начало отсчета времени принимается момент, в который значение тока сети в номинальном режиме равно нулю.

В номинальном режиме значение  $L$  равно сумме индуктивностей генератора, первичной обмотки и нагрузки сети  $L = L_g + L_1 + L_H$ , а значение  $R$  - сумме активных сопротивлений этих же участков цепи  $R = R_g + R_1 + R_H$ . Значение  $R_V$  в этом режиме составляет малую величину, равную сопротивлению замкнутого выключателя ( $10^{-4}$  Ом). При расчете режима нерегулируемого КЗ (на рис. 3.4 переход к этому режиму имитируется замыканием ключа К1) следует положить  $R_H = 0$  и  $L_H = 0$ . В режиме размыкания выключателя закон изменения его собственного сопротивления зависит от свойств плавкой вставки и может быть описан соотношением:

$$R_V = k_R \cdot (dt + 0,001 \cdot dt^6), \quad (3.3)$$

где  $dt$  - время, отсчитываемое с момента начала размыкания в миллисекундах, а  $k_R$  - коэффициент, значение которого подбирается из условия оптимального сочетания ударного тока и максимума напряжения на выключателе. Заметим, что такой вид зависимости (называемый далее характеристикой выключателя) выбран на основании данных эксперимента по размыканию сети ограниченной мощности и, несомненно, требует уточнения. Переход к режиму ограничения тока (то есть, к режиму практически разомкнутого выключателя В1) осуществляется по условию  $J_2 < 0,001 \cdot J_1$ . В этом режиме  $R_V = \infty$ ,  $J_2 = 0$ , а зависимость  $J_1(t)$  описывается только одним уравнением – уравнением (3.1). [42,43]

Начальные условия для расчета токоограничителей разных вариантов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Исходные данные к расчету токоограничителей

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Значение
Номинальное напряжение. Действующее значение.	$U_N$	кВ	127
Номинальный ток. Действующее значение. (Номинальный режим работы сети – выключатель разомкнут).	$J_N$	кА	2
Падение напряжения на токоограничителе в номинальном режиме. Действующее значение. Не более.	$\Delta U_N$	кВ	1
Ток срабатывания защиты токоограничителя. Мгновенное значение. (Ток сети, при котором подается сигнал на размыкание выключателей).	$J_P$	кА	5
Ударный ток. Мгновенное значение. Не более. (Максимально допустимое значение тока в режиме короткого замыкания).	$J_U$	кА	15
Ток в режиме «ограничения тока» (выключатель разомкнут, сопротивление нагрузки равно нулю, ток в сети ограничивается только сопротивлением обмотки токоограничителя и характеристиками генератора $L_g$ , $R_g$ ). Максимальное значение. Не более.	$J_0$	кА	15
Индуктивность генератора	$L_g$	мГн	2
Активное сопротивление генератора	$R_g$	Ом	0,01
Время запаздывания срабатывания системы управления выключателями	$\Delta \tau_p$	мсек	0,1
Допустимое время размыкания вторичной обмотки токоограничителя	$\tau_p$	мсек	от 1 до 10
Время отключения релейной защиты сети. Не более. (Это время равно максимальному времени работы токоограничителя в аварийном режиме).	$\tau_c$	мсек	120
Время восстановления работоспособности токоограничителя. (Время восстановления готовности токоограничителя к пробному включению релейной защиты).	$\Delta t$	сек	2
Количество следующих подряд пробных включений релейной защиты. Не более.	$n$	Шт.	3

В номинальном режиме токи  $J_1$  и  $J_2$  текут в противоположных направлениях. Создаваемые ими магнитные поля взаимно вычитаются. Благодаря этому, индуктивность токоограничителя в номинальном режиме (эквивалентная индуктивность  $L_{\Sigma}$ ) оказывается существенно ниже его индуктивности в режиме ограничения тока ( $L_0$ ). Одним из важнейших ограничений к конструкции токоограничителя было то, что падение напряжения на его обмотках в номинальном (не аварийном) режиме работы не должно превышать 1 кВ, следовательно, должно выполняться условие (активное сопротивление токоограничителя значительно меньше индуктивного):  $\omega \cdot L_{\Sigma} < \Delta U_N / J_N = 0,5$  Ом. Для этого приходилось искать дополнительные конструктивные решения для обеспечения данного соотношения. В режиме ограничения тока, значение тока, практически, определяется только индуктивностью первичной обмотки токоограничителя, причем как показывает анализ, его максимальное значение равно удвоенной амплитуде переменной составляющей. Отсюда следует условие для  $L_1$ :  $\omega \cdot L_1 \approx 2\sqrt{2} \cdot U_N / J_0 = 23,95$ . Из системы (3.1-3.2) в (пренебрежении активными сопротивлениями цепей) следует:  $L_{\Sigma} = L_1 \cdot (1 - M^2 / \sqrt{L_1 \cdot L_2})$ . Значит, определенное техническим заданием отношение  $L_{\Sigma} / L_1$  может быть обеспечено только при коэффициенте связи между обмотками  $k > 0,979$ . Такую связь невозможно обеспечить, между обмотками, выполненными в виде отдельных катушек. Поэтому, физически токоограничитель необходимо выполнить в виде чередующихся секций первичной и вторичной обмоток.

### 3.2.3 Методика расчета токоограничителей автотрансформаторного типа

Особенность токоограничителя автотрансформаторного типа состоит в том, что его обмотки связаны не только индуктивно, но и гальванически (см. схему на рис.3.5.).

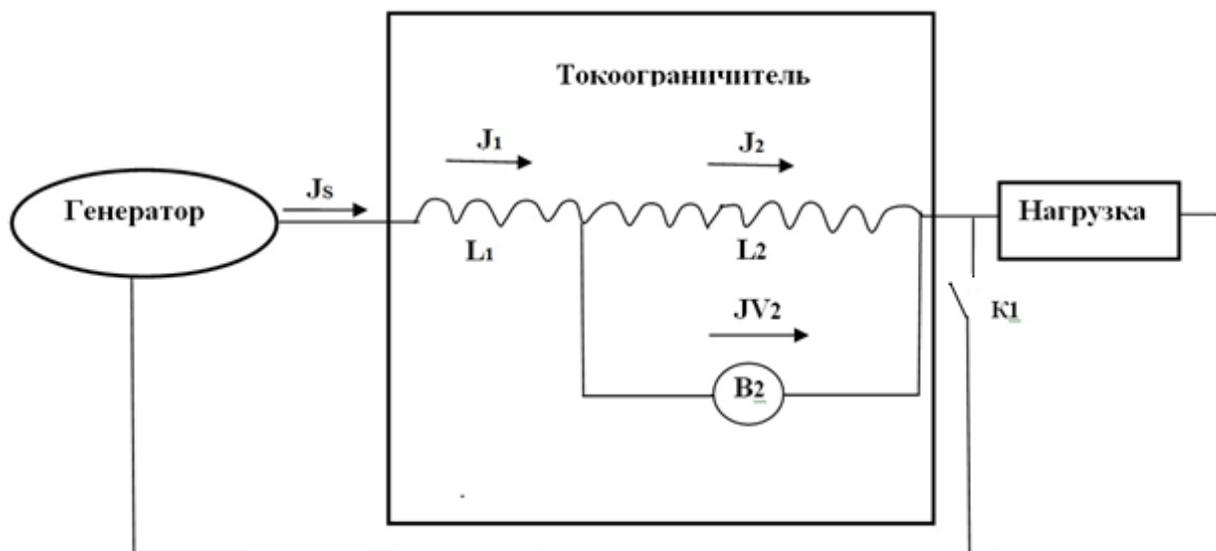


Рис.3.5. Схема включения токоограничителя автотрансформаторного типа.

Поэтому, естественнее считать, что такой токоограничитель имеет только одну обмотку, разделенную на секции. В номинальном режиме ток секции  $L_1$  равен току сети  $J_1 = J_S$ , а ток короткозамкнутой секции, направлен противоположно  $J_S$ . Это, как и в случае токоограничителя трансформаторного типа, обеспечивает низкое значение эквивалентной индуктивности  $L_{\Sigma}$ . В процессе размыкания выключателя, ток соответствующей секции меняет направление и далее растет до значения, равного току сети. В режиме ограничения тока все секции обмотки оказываются соединенными последовательно и все участвуют в формировании необходимой индуктивности  $L_0$ . В этом и состоит резерв экономии материала по сравнению с трансформаторной схемой, в которой величина  $L_0$  равна индуктивности только первичной обмотки.

При наличии двух секций, из которых секция №1 не содержит выключателя, а секция №2 короткозамкнута, распределение токов определяется системой из двух дифференциальных уравнений:

$$L \cdot \frac{dJ_s}{dt} + M_{12} \cdot \frac{dJ_2}{dt} = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) - R \cdot J_s - R_2 \cdot J_2 \quad (3.4)$$

$$M_{12} \cdot \frac{dJ_s}{dt} + L_2 \cdot \frac{dJ_2}{dt} = R_{V2} \cdot (J_s - J_2) - R_2 \cdot J_2 \quad (3.5)$$

Здесь  $R_2$ ,  $J_2$  - активное сопротивление и ток секции 2,  $M_{12}$  - взаимная индуктивность секций 1 и 2,  $R_{V2}$  - сопротивление выключателя секции 2,  $L$ ,  $R$  - индуктивность и сопротивление участка цепи, по которому течет ток сети  $J_s$ , равный току секции №1. Их значения (в зависимости от режима определяются также, как и в варианте токоограничителя трансформаторного типа. Для расчета токов через выключатели и напряжений на них используются соотношения:  $J_{V2} = J_s - J_2$ ,  $U_{V2} = R_{V2} \cdot J_{V2}$ . Момент полного размыкания выключателя устанавливается условием  $J_{V2} < 0,001 \cdot J_2$ . После полного размыкания, из системы исключается уравнение (3.5), а (3,4) принимает вид:

$$(L_1 + L_2 + M_{12} + L_g) \cdot \frac{dJ_s}{dt} = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) - (R_1 + R_2 + R_g) \cdot J_s \quad (3.4a)$$

С этого момента  $J_1 = J_2 = J_s$ . После полного размыкания выключателя, напряжение на нем не может быть вычислено как произведение  $R_{V2} \cdot J_2$ , так как это соотношение становится неопределенностью вида  $\infty \cdot 0$ . Поэтому используется соотношение:

$$U_{V2} = (L_2 + M_{12}) \cdot \frac{dJ_2}{dt} - J_2 \cdot R_2 \quad (3.6)$$

Согласно технической характеристике выключателя, напряжение на нем в течение всего периода отключения не должно превышать 70 kV. Это условие ограничивает возможные размеры секции №2 и, соответственно, снижает эффективность замены трансформаторной схемы на автотрансформаторную. Особенно существенно такое ограничение будет

влиять на характеристики высоковольтных токоограничителей (220 kV и выше). Выходом из этой ситуации является использование вместо секции №2 нескольких последовательно соединенных секций, каждая из которых замкнута собственным выключателем. Для расчета такой схемы может использоваться система уравнений, аналогичная (3.4-3.5). Однако, порядок системы возрастает в этом случае до значения  $n+1$ , где  $n$  – количество короткозамкнутых секций, а в качестве коэффициентов уравнений используется матрица взаимных индуктивностей секций.

#### 3.2.4 Особенности программной реализации расчета характеристик токоограничителей

Для численного расчета характеристик токоограничителя использовались две программы: программа расчета собственных и взаимных индуктивностей обмоток и программа расчета переходных процессов.

Для каждой из рассматриваемых конструкций рассчитывалось несколько вариантов переходных процессов с целью выбора оптимального сочетания характеристик выключателей, при условии соблюдения всех заданных параметров.

Для расчета собственных и взаимных индуктивностей (а также распределения магнитного поля) использовались традиционные методы расчета, за исключением двух отличий, обусловленных спецификой задачи:

1. Обычно собственные и взаимные индуктивности катушек, а также создаваемые ими магнитные поля рассчитываются в предположении равномерного распределения тока по их сечению. В рассматриваемом случае такое упрощение недопустимо, так как витки различных обмоток токоограничителя могут быть совмещены в пределах одной катушки. Поэтому, расчет вышеуказанных характеристик производился с учетом точных координат каждого витка.

2. Поскольку эквивалентная индуктивность токоограничителя в номинальном режиме определяется разностью близких величин (компонент матрицы взаимных индуктивностей), точность расчета индуктивностей была повышена до  $10^{-6}$ .

Расчет переходных процессов состоит из последовательного рассмотрения четырех режимов.

а) Номинальный режим - установившийся режим работы сети, существовавший до момента возникновения короткого замыкания.

б) Режим нерегулируемого короткого замыкания – промежуток времени от момента возникновения КЗ до начала размыкания выключателя. Этот режим содержит две части – промежуток времени от начала КЗ до момента подачи сигнала управляющей системой на размыкание выключателя (сигнал подается по достижении током сети заданного техническим заданием предельного значения  $J_p$ ) и время задержки срабатывания системы  $\Delta\tau_p$  – промежуток от момента подачи сигнала на размыкание до фактического начала размыкания выключателя (значение  $\Delta\tau_p$  определяется техническими характеристиками управляющей системы). Скорость изменения тока в этом режиме ограничивается только сопротивлением защищаемого участка сети (в контексте технического задания - сопротивлением генератора  $\omega L_g, R_g$ ) и эквивалентным сопротивлением токоограничителя (сопротивлением токоограничителя при замкнутом выключателе).

в) Режим размыкания выключателя. Длительность этого режима определяется характеристикой выключателя. – зависимостью, которая описывает увеличение сопротивления плавкой вставки взрывного выключателя, выключателя предохранительного типа, сопротивление промежутка  $\Pi$  (см.рисунок 2.1и рисунок 3.1) размыкающихся контактов со временем и т.д. В случае ограничителя ударного тока взрывного действия характеристика может варьироваться путем изменения материала и размеров плавкой вставки. Выбор оптимальной характеристики для каждого варианта токоограничителя – одна из задач расчета.

г) Режим ограничения тока - режим, установившийся после размыкания выключателя токоограничителя. Максимальная величина тока в этом режиме  $J_0$  определяется практически только индуктивностью обмотки токоограничителя. Поэтому, заданное значение  $J_0$  (наряду с величиной номинального тока  $J_N$ ) являются основными параметрами, определяющими весогабаритные характеристики токоограничителя.

### 3.2.5 Результаты расчётов.

Как показано в работе [44], при напряжении 10 кВ использование стали может оказаться оправданным, так как даёт экономию в расходе провода и в мощности тепловых потерь в 2,5 раза. При этом расход стали оказывается сравним с её расходом в трансформаторах того же класса мощности. Напротив, применение стального магнитопровода в ТУ на 110 кВ и выше не имеет смысла, в силу ограниченности индукции насыщения стали. Поэтому, в приводимых ниже результатах, варианты конструкций со сталью не рассматриваются.

В номинальном режиме токи секций текут в противоположных направлениях. Создаваемые ими магнитные поля взаимно вычитаются. Благодаря этому, индуктивность токоограничителя в номинальном режиме (эквивалентная индуктивность  $L_{\Sigma}$ ) оказывается существенно ниже его индуктивности в режиме ограничения тока ( $L_0$ ). Отношение  $L_{\Sigma}/L_0$  тем больше, чем выше коэффициент связи между первичной и вторичной обмотками. Исходные данные ограничивают падение напряжения на токоограничителе в номинальном режиме величиной 1 кВ. Для выполнения этого условия необходимо обеспечить значение коэффициента связи между секциями  $k > 0,979$ . Такую связь невозможно обеспечить при выполнении секций в виде отдельных катушек. Поэтому, физически токоограничитель выполняется в виде чередующихся частей секций первичной и вторичной обмоток.

Итоговые результаты проведенных расчетов сведены в таблицу 3.2, схемы и геометрические характеристики обмоток даны на рис.3.6-3.8. Всего представлено три варианта: №1 – токоограничитель трансформаторного типа, и два варианта токоограничителей автотрансформаторного типа (№2, №3). Предполагается, что обмотки токоограничителей №1 и №2 выполнены из медного проводника, а обмотки токоограничителя №3 – из сверхпроводящей ВТСП-ленты (особенности выбора характеристик сверхпроводящей обмотки рассмотрены в разделе 3.3).

Таблица 3.2. Основные характеристики токоограничителей

Тип токоограничителя	№1	№2	№3
Внутренний диаметр обмотки [ м ]	2,15	1,45	1,5
Внешний диаметр обмотки [ м ]	2,98	2,9	2,5
Высота обмотки [ м ]	1,9	0,835	1,0
Общее число витков	240	206	206
количество дисковых катушек	-	9	-
Общий вес обмотки [ Т ]	26,9	18,3	0,56
Тепловые потери в номинальном режиме [кВт]	296	178,2	18*
Индуктивность в номинальном режиме [мГн]	1,28	1,56	1,4
Индуктивность в режиме «ограничения тока» [мГн]	76,5	76,8	77,1
Максимальный ток в переходном процессе [ кА ]	14,0	14,2	14,1
Максимальный ток в режиме «ограничения тока» [ кА ]	7,25	7,23	7,3

\* Потери даны с учетом холодильного коэффициента  $K_{\text{х}}=10$ .

Основным параметром, ограничивающим возможности выключателей взрывного типа, является допустимое напряжение размыкания. До сих пор они используются при действующих значениях напряжения размыкаемой цепи до 35 – 40 кВ. При этом известно [42], что максимальные напряжения в момент размыкания вдвое выше действующих значений. В соответствии с техническими характеристиками выключателей, все предложенные

конструкции рассчитывались, исходя из условий: максимальное напряжение размыкания на выключателе в течение всего переходного процесса не должно превышать 70 кВ.

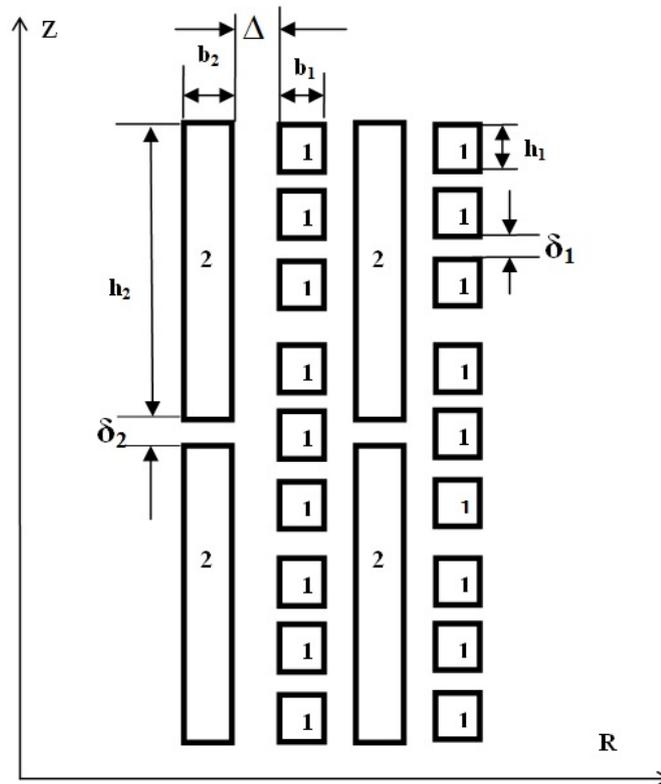


Рис.3.6. Схема обмотки токоограничителя трансформаторного типа (Вариант №1 в табл. №2).

Геометрические характеристики обмотки (тип обмотки – послойная).

Характеристика	Обозначение	
Число слоев первичной обмотки	$n_1$	5
Число слоев вторичной обмотки	$n_2$	5
Расстояние между слоями	$\Delta$	15 мм
Число витков в слое первичной и вторичной обмоток, соответственно	$m_1, m_2$	40, 8
Расстояние между витками в слоях первичной и вторичной обмоток	$\delta_1 ; \delta_2$	11; 10 мм

Структура витка первичной обмотки	$b_1 \cdot h_1$	10 медных лент сечением $2,5 \cdot 35 \text{ мм}^2$ каждая. Общее сечение $875 \text{ мм}^2$
Структура витка вторичной обмотки	$b_2 \cdot h_2$	10 медных лент сечением $2,5 \cdot 200 \text{ мм}^2$ каждая. Общее сечение $5000 \text{ мм}^2$

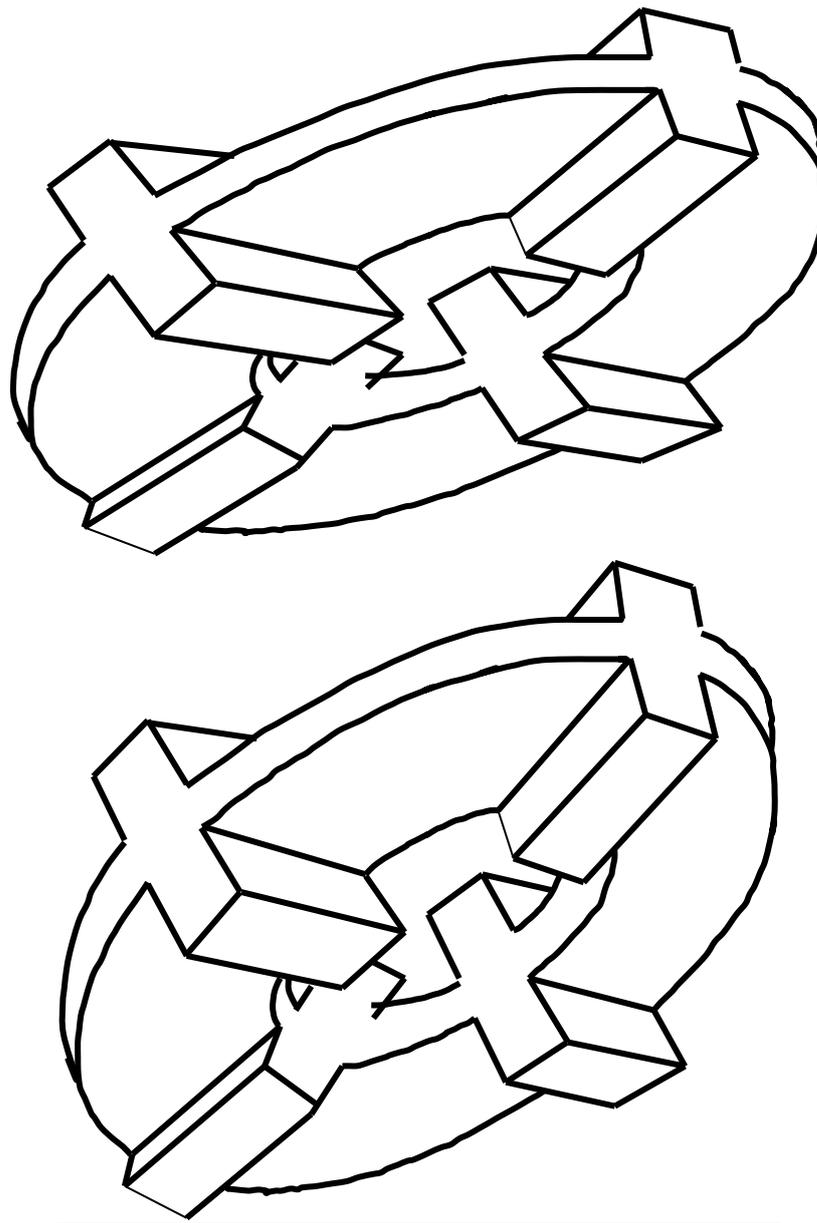


Рис.3.7

Предполагаемая конструкция дисков токоограничителей для вариантов № 2 и №3.(см. табл. № 2)

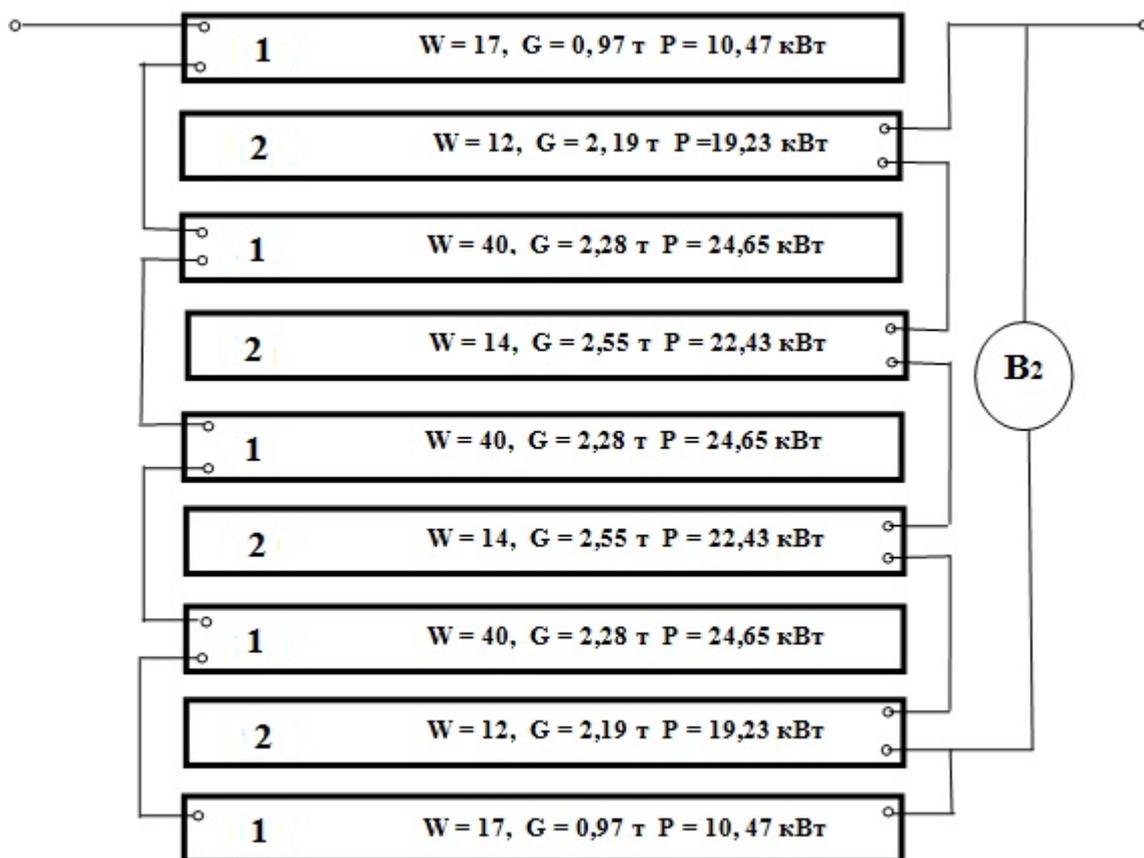


Рис.3.8 Схема обмотки автотрансформаторного типа с одним выключателем. (вариант №2 и вариант №3 в таблице 2).

Цифры – номер обмотки, которой принадлежит диск.  
(1 – первичная обмотка, 2 – вторичная обмотка)

W, G, P – число витков в диске, вес меди в диске, мощность тепловых потерь в диске (в номинальном режиме).

Геометрические характеристики обмотки (тип обмотки – дисковая).

Характеристика	Обозначение	
Число дисков в секциях №1, №2 соответственно	$n_1, n_2$	5, 4
Число витков секций №1, №2 соответственно	$W_1, W_2$	154, 52
Расстояние между токоведущими частями витков соседних дисков	$\delta$	20 мм
Высота токоведущей части витка в диске	$h$	75 мм
Структура витка секции № 1	$b_1 * h$	5 медных лент сечением $2,5 * 75 \text{ мм}^2$ каждая. Общее сечение $937,5 \text{ мм}^2$
Структура витка секции № 2	$b_2 * h$	16 медных лент сечением $2,5 * 75 \text{ мм}^2$ каждая. Общее сечение $3000 \text{ мм}^2$

Понижение напряжения размыкания в токоограничителях трансформаторного типа достигается соответствующим выбором коэффициента трансформации  $K_T$ . При этом изменение  $K_T$  практически, не влияет ни на вес обмотки, ни на потребляемую мощность (число витков вторичной обмотки снижается по отношению к числу витков первичной обмотки в  $K_T$  раз, однако, во столько же раз возрастает ток вторичной обмотки и, следовательно, необходимое сечение витка). В этой ситуации возможности повышения  $K_T$  ограничены лишь соображениями технологического характера – слишком большое сечение витка при высоких значениях  $K_T$ . В случае токоограничителей автотрансформаторного типа ситуация иная: чем большая часть обмотки закорочена, тем меньше ее объем и потребляемая мощность. Следовательно, использование выключателя (или выключателя с более высокими значениями напряжений размыкания) становится решающим фактором улучшения характеристик токоограничителя в целом. Из табл.3.2 видно, что при использовании выключателя вес обмотки по сравнению с токоограничителем трансформаторного типа уменьшается в 1,47 раза, а тепловые потери в номинальном (не аварийном) режиме работы – в 1,66 раза. Заметим, что соотношение между выигрышем в весе обмотки (и соответственно, в ее объеме  $V$ ) и в потребляемой мощности зависит только от вариаций в выборе плотности тока, поскольку  $P = \rho \cdot j^2 \cdot V$ . В предлагаемых конструкциях плотность тока была несколько снижена по сравнению с вариантом послойной обмотки в связи с ухудшением условий охлаждения.

В процессе расчетов была выявлена еще одна особенность: чем компактнее обмотка, тем легче достичь заданного значения эквивалентной индуктивности токоограничителя  $L_{\Sigma}$ . Если в токоограничителе трансформаторного типа (№1) необходимого результата удалось достичь только в варианте послойного выполнения обмотки, то для автотрансформаторного типа оказалось возможным использовать схему

чередующихся дисковых катушек. Этот вариант представляется предпочтительнее с точки зрения технологии изготовления в серийном производстве: диски могут быть замоноличены и снабжены ребрами жесткости, размеры которых одновременно обеспечивают необходимый для охлаждения зазор между дисками (достаточно 15 – 20 мм). В результате, конструкция обмотки становится модульной (рис.3.7). Варьируя количество базовых модулей-дисков можно изменять характеристики токоограничителей. Специальное оборудование необходимо лишь при изготовлении дисков. Сборка конструкции из дисков представляется несложной технологической задачей. В случае, если прочность компаунда окажется недостаточной при расчетной толщине диска, возможно использование, в качестве базовых модулей, сборки из пары дисков (принадлежащих разным секциям обмотки), разделенных ребрами жесткости. Прочность такой конструкции значительно выше. По мере уменьшения объема обмотки преимущества дисковой конструкции возрастают.

Изменение токов и напряжений в переходном процессе для вариантов №1 – №3 качественно одинаковы. Аналогичны и результаты анализа зависимости параметров переходного процесса от таких факторов как времени начала КЗ, значения  $L_0$ ,  $L_{\Sigma}$  и т.д. Поэтому, результаты расчета переходных процессов представлены только для одного из вариантов (для варианта №2 на рис.3.9 – 3.11). Для всех рисунков:  $t^*$  - отношение времени протекания переходного процесса ко времени цикла изменения тока ( $T=20$  мсек);  $J_s^*$ ,  $J_{V2}^*$ ,  $U_{V2}^*$  - токи и напряжение, нормированные на соответствующие номинальные действующие значения. Параметр кривых – момент возникновения К.З.

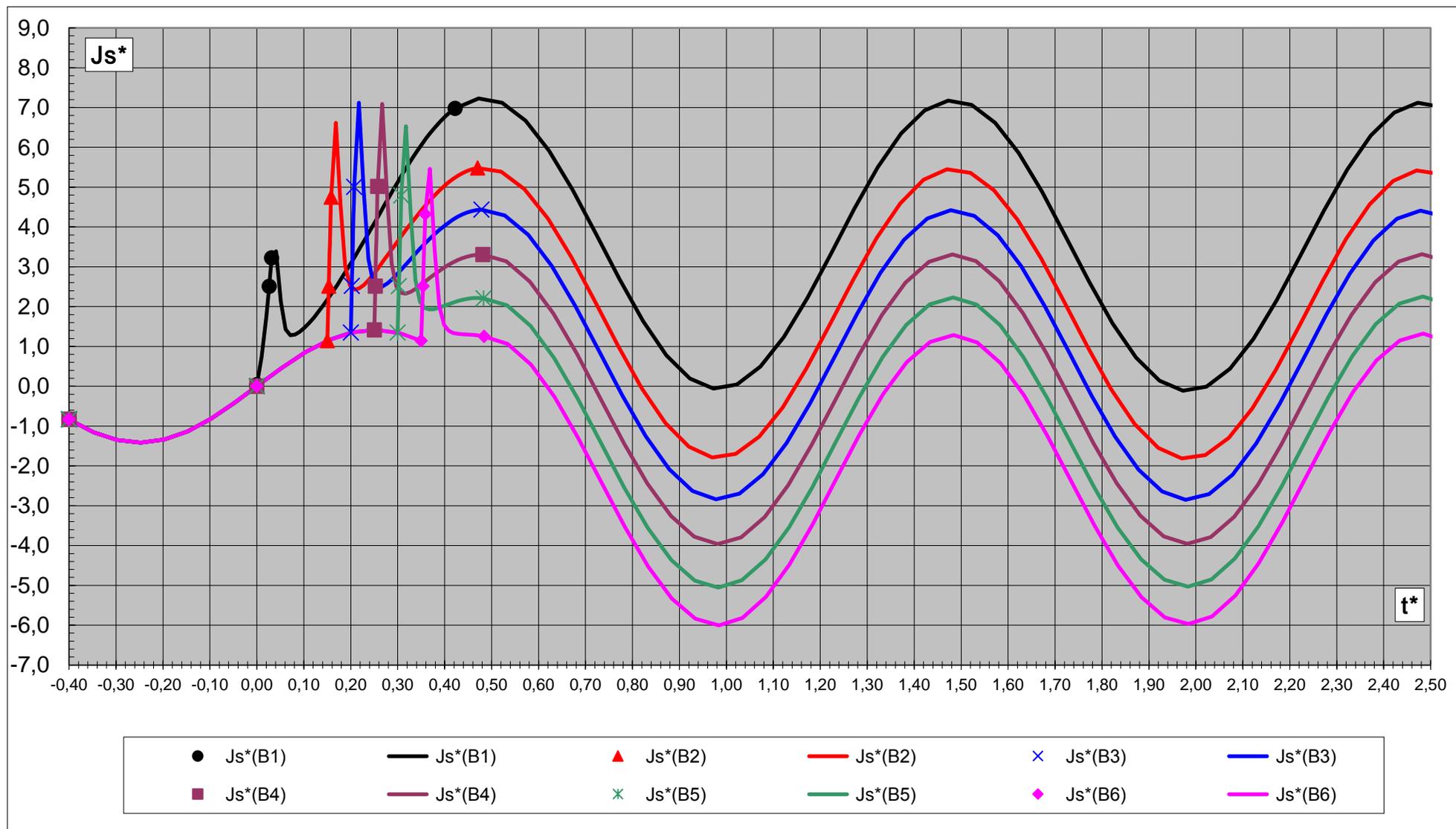


Рис. 3.9. Изменение тока сети в переходном процессе для токоограничителя №2 в зависимости от момента возникновения КЗ

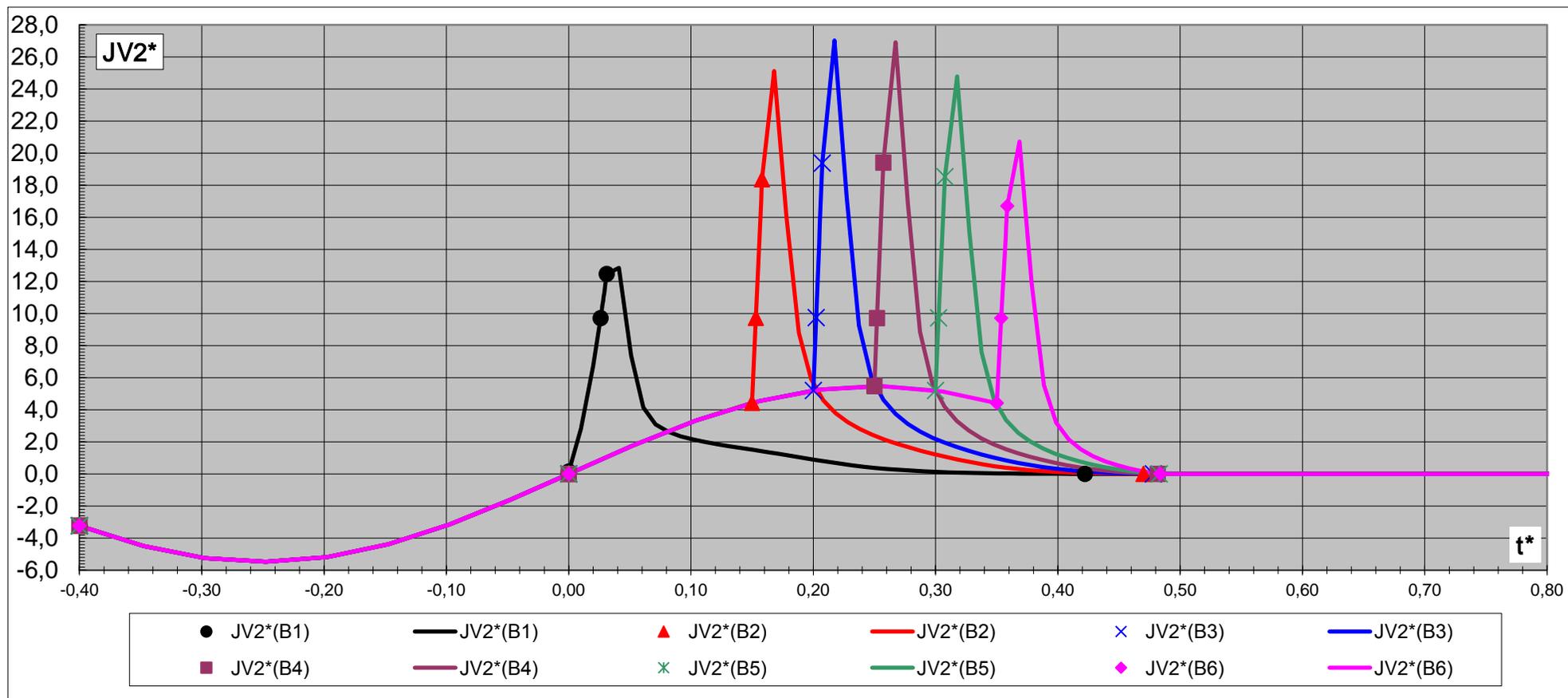


Рис. 3.10 Изменение тока через выключатель в переходном процессе для токоограничителя №2 в зависимости от момента возникновения КЗ

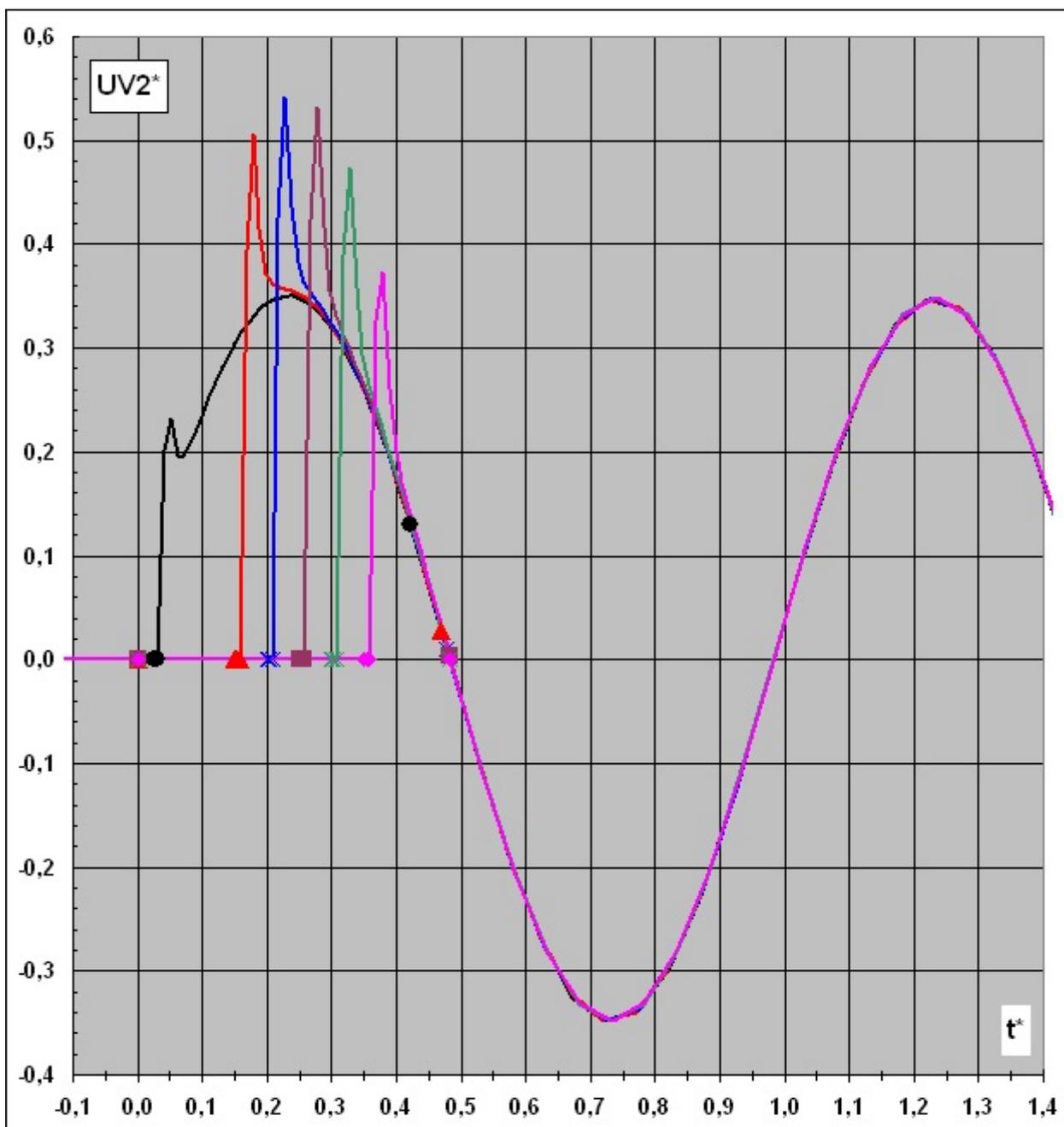


Рис. 3.11 Изменение напряжения на выключателе в переходном процессе для токоограничителя №2 в зависимости от момента возникновения КЗ

Из приведенных зависимостей видно, что значения напряжения, близкие к максимальным, действуют лишь на начальной стадии процесса размыкания. Уже через 1 мс напряжение на выключателе и текущий через него ток падают вдвое, в то время как весь процесс размыкания занимает время порядка 3,5 - 5 мс. Не исключено, что благодаря этой особенности,

возможно допустить большее значение максимального напряжения размыкания и, соответственно, уменьшить вес обмотки.

### 3.2.6 Оценка условий охлаждения обмоток

Условия охлаждения являются наихудшими для обмотки, выполненной в виде дисков. Поэтому, достаточно ограничиться оценкой охлаждения в токоограничителе варианта №2.

а). Охлаждение обмоток в номинальном режиме.

Вследствие различного числа витков мощность теплоотдачи в различных дисках обмотки варьирует от 8,69 до 24,65 кВт. Поэтому, существенно меняются и условия охлаждения дисков. Естественно, что последние должны быть удовлетворительными даже для наиболее нагруженных дисков.

Теплопередача внутри диска значительно улучшается благодаря армированию компаунда медным проводником. Для передачи тепла к торцам медной ленты в наиболее нагруженных дисках (для варианта №2 - это центральные диски секции 1, в которых мощность тепловыделения равна 24,65 кВт) достаточно перепада температур менее 1°C. Перепад температур при передаче тепла от торцов витков к поверхности этих же дисков не превысит 30 °C, при толщине изоляции не более 5 мм и теплопроводности компаунда не менее 0,5 Вт/мград.

Коэффициент теплоотдачи от поверхности диска к трансформаторному маслу достаточно высок. Однако, во избежание старения масла, не рекомендуется превышать значения теплового потока  $q = 1,6 \text{ кВт/м}^2$  (в случае отсутствия принудительной циркуляции масла). В среднем по обмотке это условие выполняется. Однако, для наиболее нагруженных дисков соответствующие значения составляют  $2,49 \text{ кВт/м}^2$ . В принципе, если такое превышение полагать критичным, возможно увеличить теплоотдающую поверхность, придав ей волнообразную форму (форму листа шифера). В этом варианте площадь поверхности

увеличивается в  $\pi d/2d$  раз, где  $d$  – период волны, и тепловые потоки для всех дисков оказываются ниже рекомендуемых.

б). Охлаждение обмоток в аварийном режиме.

Потери тепла в аварийном режиме существенно возрастают как за счет увеличения амплитуды колебаний тока, так и благодаря наличию постоянной составляющей тока  $J_s$ . Интегрируя выражение  $J^2 R$  по времени для зависимости  $J(t) = J_s + \Delta J \cdot \sin(\omega t)$  и нормируя полученные потери на величину потерь в номинальном режиме, получим:

$$P_{кз} = P_n \cdot k_p, \quad (3.8)$$

где 
$$k_p = \frac{1}{J_n^2} \cdot \left( J_s^2 + \frac{4}{\pi} \cdot J_s \cdot \Delta J + \frac{1}{2} \cdot \Delta J^2 \right). \quad (3.9)$$

Значения  $\Delta J$  и  $J_s$  изменяются в зависимости от момента времени возникновения КЗ. Принимая наихудшие, с точки зрения увеличения мощности потерь, значения  $\Delta J = J_s = 7,25$  кА, получим, что для всех вариантов  $k \leq 40$ . Значит, значение мощности потерь в режиме короткого замыкания может достигать в расчете на единицу массы проводника 0,4 кВт/кг. Однако, время переходного процесса не превышает 120 мс. Поэтому, количество выделяемого тепла составит не более 48 Дж/кг. Полагая нагрев меди в режиме адиабатическим, получим, что повышение ее температуры за все время процесса не превысит, пренебрежимо малой величины - 0,13 град. Следовательно, даже возникновение нескольких режимов короткого замыкания подряд практически не влияет на температурный режим обмотки токоограничителя. Заметим, что неравномерность распределения витков в дисках не влияет на нагрев обмотки в аварийном режиме, так как мощность потерь в диске и масса меди изменяются практически одинаково.

### 3.2.7 Оценка электродинамических усилий

Компенсация электродинамических усилий при послойном исполнении обмотки – стандартная задача, решение которой не является проблемой. Поэтому, возможно ограничиться оценкой ситуации для варианта №2.

В номинальном режиме работы токоограничителя и в режиме нерегулируемого КЗ магнитные поля дисков компенсируют друг друга. Поэтому, электродинамические усилия в этих режимах незначительны. Наибольшие нагрузки достигаются при «максимальном значении тока в режиме ограничения тока».

Напряжение растяжения в изолированном витке обмотки радиуса  $\rho$ , помещенном в магнитное поле  $B$ , равно:

$$\sigma_p = B_z \cdot j \cdot \rho, \quad (3.10)$$

где  $B_z$  – проекция поля на ось  $z$ ,  $j$  – плотность тока в витке. Произведение  $B_z \cdot \rho$  максимально на внутреннем радиусе центрального диска обмотки. Максимальное значение  $B_z$  для варианта №2 в этих точках составляют 2,44 Тл, сечения проводника в обмотках дисков даны на рис.3.6. При этих данных, значение  $\sigma_p$  для вариантов №2 с равны: 27,3 Н/мм<sup>2</sup>. Это не превышает допустимых значений  $\sigma_p$  для меди. Относительная деформация изолированного витка (при модуле упругости  $12 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>) составит  $2,28 \cdot 10^{-4}$  при напряжении 27,4 н/мм<sup>2</sup> и  $6,7 \cdot 10^{-4}$  при напряжении 80,4 Н/мм<sup>2</sup>. Следовательно, если для компаунда отношение допустимого значения напряжения к модулю упругости будет удовлетворять условию: для №2  $[\sigma_k] / E_k > 2,28 \cdot 10^{-4}$ , деформация витков обмотки не вызовет разрушения компаунда ни при каких обстоятельствах. Если это условие не будет выполнено, потребуется более точная оценка – расчет механической прочности диска, как целого. На внешних витках, за счет изменения знака  $B_z$ , возникает радиальное усилие, направленное к оси обмотки. Оно максимально на центральных дисках обмоток и составляет 9,5 Н/мм<sup>2</sup>. Для

таких витков, возникающая при сжатии неустойчивость, должна компенсироваться упругостью компаунда.

Сила, действующая на виток вдоль оси  $z$ , направлена к центру обмотки и равна:

$$F_z = \bar{B}_\rho \cdot J \cdot 2 \cdot \pi \cdot \rho, \quad (3.11)$$

где  $\bar{B}_\rho$  - радиальная компонента магнитного поля, усредненная вдоль высоты витка  $h$ .

Суммирование (3.11) по виткам дисков дает следующие результаты: для №2 электродинамическое усилие максимально на крайних дисках и составляет 147 тонн. Эти усилия должны восприниматься ребрами жесткости дисков. Если их площадь принять равной 10% площади поверхности диска, то напряжение смятия составит для №2 3,0 Н/мм<sup>2</sup>. Это - значительно меньше допустимых значений принятых для большинства используемых электроизоляционных материалов ( $\sigma_{см} \approx 35$  Н/мм<sup>2</sup>). Однако, при столь высоком значении суммарной нагрузки, причиной разрушения диска могут быть и локальные изгибающие усилия в промежутках между опорными поверхностями. Поэтому, вопрос выбора материала, формы и расположения ребер жесткости требует дополнительного анализа. Поскольку электродинамические нагрузки колеблются от максимального до нулевого значения с частотой 100 Гц, а масса дисков составляет от 1 до 3 тонн, целесообразно обеспечить возможность смещения дисков по оси  $z$  в пределах 3 -5 мм за счет упругости компаунда. Это снизит максимальные значения усилий сжатия на ребра жесткости и, кроме того, обеспечит равномерное распределение напряжений смятия.

### 3.3 Перспективы использования сверхпроводящих обмоток в токоограничивающих устройствах

В последнем столбце таблицы №3.2 (вариант №3) приведены результаты расчёта характеристик токоограничителя с обмоткой из высокотемпературного сверхпроводника.

Использование сверхпроводниковых обмоток позволило бы повысить плотность тока в них приблизительно в сто раз при одновременном уменьшении тепловых потерь до нуля в случае постоянного тока и в 10-50 раз на частоте 50 Гц. Соответствующее резкое улучшение экономичности по тепловым потерям и массогабаритных характеристик и при переходе к таким обмоткам очевидно. Однако, пока использованию ВТСП обмоток в магнитных системах препятствуют два обстоятельства.

1. Существенное снижение плотности критического тока при наложении внешнего магнитного поля (приблизительно в пять раз при увеличении магнитного поля до 2 Тл).

2. Резкое увеличение потерь на перемагничивание в сверхпроводнике во внешнем переменном магнитном поле (в 20-30 раз при увеличении амплитуды колебания поля от 0,01 до 0,1 Тл). Уровень этих потерь на переменном токе не создает проблем с точки зрения возможностей охлаждения обмотки, однако серьезно ухудшает экономические показатели, поскольку *КПД* отвода тепла при температуре жидкого азота составляет величину порядка 10%.

Однако, для токоограничителей рассмотренных типов эти обстоятельства не являются критическими, так как в номинальном режиме магнитные поля в его первичной и вторичной обмотках взаимовычитаются. В результате, сверхпроводник работает в условиях, близким к условиям передачи электрического поля в отсутствии внешнего поля. Для этих условий приемлемы те характеристики сверхпроводников, которые уже достигнуты в настоящее время.

Рассмотрим характеристики токоограничивающего устройства с токонесущим элементом, имеющим параметры современных высокотемпературных сверхпроводников второго поколения. В качестве прототипа примем сверхпроводник марки SCS-12050, выпускаемый фирмой Super Power (USA) [45]. Это полностью стабилизированная медью лента сечением 12x0,095 мм. Коэффициент заполнения ленты медью – 50%. Критическая плотность тока ленты в расчете на её полное сечение равна  $J_C=220 \text{ A/мм}^2$ . Потери на частоте 50 Гц в расчете на единицу длины ленты составляют  $P_{SP}=0,4 \text{ Вт/(кА}\cdot\text{м)}$ . Лента выпускается кусками длиной до 600 м с гарантированной однородностью характеристик по длине - 5%.

Для лучшей сравнимости результатов будем полагать, что внутренний диаметр обмотки и конструкция токонесущего элемента совпадают с данными варианта токоограничителя №2. Возможны два варианта в решении вопроса о необходимом значении критического тока.

1. Обмотка должна оставаться полностью сверхпроводящей только при номинальном режиме работы сети. В этом случае при превышении  $I_H$  избыток тока будет вытеснен в медную подложку, что благодаря условию полной стабилизации, не нарушит работоспособности токоограничителя. Возникновение дополнительных потерь в меди не существенно, так как режимы превышения  $I_H$  предполагаются кратковременными. В таком варианте следует задать (с учетом запаса надежности в 20%)  $I_C=1,2\cdot\sqrt{2}\cdot I_H=3,4 \text{ кА}$ .

2. Обмотка должна оставаться полностью сверхпроводящей вплоть до тока отключения. При этом сценарии, с учетом такого же коэффициента запаса,  $I_C=1,2\cdot I_0=7,2 \text{ кА}$ .

Рассмотрим второй сценарий, как наименее благоприятный с точки зрения расхода сверхпроводника, то есть  $I_C=7,2 \text{ кА}$ . Кроме того, учтем, что поскольку сечение токонесущего элемента будет выше, чем сечение ленты прототипа, возрастает собственное поле проводника, что, в свою

очередь, может снизить критическую плотность тока и увеличить потери. В связи с этим прием ожидаемую критическую плотность тока и величину потерь хуже, чем в ленте:

$$j_c = 150 \text{ A/мм}^2, P_{sp} = 0,8 \text{ Вт/(кА}\cdot\text{м)}.$$

Исходя из этих данных, принимаем сечение шины из сверхпроводящего композита равным  $2 \times 12 \text{ мм} = 24 \text{ мм}^2$ . При сохранении зазоров между шинами такими же, как и в варианте №2, получаем, что расстояние между центрами шин первичной и вторичной обмоток сокращается с 10 мм до 7 мм, а расстояние между центрами витков в слое – с 90 мм до 17 мм. Это позволяет увеличить плотность расположения витков в слое более чем в пять раз при одновременном увеличении плотности обмотки в радиальном направлении. Полученный эффект виден из вариантов №2 и №3 таблицы 3.2. Длина проводника снизилась лишь в 1,4 раза. Однако, благодаря уменьшению сечения его масса сократилась более, чем в 30 раз. Мощность потерь в номинальном режиме сократилась в 100 раз. При оценке фактических потерь электроэнергии нужно учесть *КПД* отвода тепла при температуре жидкого азота. Однако и с учетом этого обстоятельства мощность потерь электроэнергии сократилась на порядок.

Результаты анализа условий охлаждения обмотки аналогичны полученным выше для токоограничивающих устройств с нормальной обмоткой. В номинальном режиме тепловая нагрузка в расчете на площадь поверхности только внешней стороны шины токнесущего элемента равна  $0,066 \text{ кВт/м}^2$ . С точки зрения возможностей охлаждения обмотки такая мощность теплоотдачи ничтожна. В переходном режиме часть тока, превышающая  $I_c$ , будет протекать по медной подложке. Нагрев обмотки в этом случае зависит от конструктивных особенностей токнесущего элемента, однако в силу кратковременности режима не должен превышать 5 К.

### 3.3.1 Расчет потерь в сверхпроводящей обмотке токоограничителя трансформаторного типа

Схема токоограничителя трансформаторного типа приведена на рис.3.4. Токоограничитель содержит две обмотки, индуктивно связанные, но не соединенные гальванически. Первичная обмотка включена последовательно в защищаемую сеть, вторичная - замкнута накоротко через выключатель  $B_1$ . Ток первичной обмотки  $J_1$  равен току защищаемой сети  $J_S$ . Ток вторичной обмотки  $J_2$  наводится за счет ЭДС электромагнитной индукции, создаваемой первичной обмоткой. В номинальном режиме работы сети магнитные поля, создаваемые обмотками взаимно вычитаются. Это обеспечивает минимальное значение индуктивности токоограничителя. В случае короткого замыкания (которое на схеме имитируется замыканием выключателя  $K_1$ ) управляющая система подает сигнал на быстродействующий выключатель  $B_1$ . В результате, ток вторичной обмотки затухает, и индуктивность токоограничителя возрастает до значения индуктивности первичной обмотки. Последняя рассчитывается таким образом, чтобы ограничить ток сети до допустимого значения  $J_m$ . Величина  $J_m$  в несколько раз больше номинального тока сети. Однако, и расчетное время работы токоограничителя при разомкнутой вторичной обмотке (в режиме «ограничения тока») может быть принято равным 0,12 сек. Причина в том, что согласно регламенту правил эксплуатации электрических сетей, помимо токоограничителя в сети должны присутствовать аппараты стандартной релейной защиты, осуществляющие полное отключение за время не более 120 мс. Причем, отключение от сети на длительное время должно быть осуществлено этими аппаратами уже после трех неудачных попыток их повторного включения.

Таблица 3.3. Основные характеристики токоограничителей.

Вид обмотки токоограничителя	послойная, медная	послойная, сверхпроводящая
Внутренний диаметр обмотки [м]	2,15	2,15
Внешний диаметр обмотки [м]	2,98	2,98
Высота обмотки [м]	1,9	1,55
число витков первичной обмотки	200	192
число витков вторичной обмотки	40	48
Общий вес обмотки [Т]	26,9	1,1
Тепловые потери в номинальном режиме [кВт]	296	42*
Индуктивность в номинальном режиме [мГн]	1,28	1,12
Индуктивность в режиме «ограничения тока» [мГн]	76,5	76,3
Максимальный ток в переходном процессе [кА]	14,0	14,04
Максимальный ток в режиме «ограничения тока» [кА]	7,25	7,27

\*Указана сумма гистерезисных потерь и потерь в медной матрице с учетом холодильного коэффициента  $K_{\chi}=8$ .

В левой колонке таблицы 3.3 приведены расчетные характеристики токоограничителя трансформаторного типа с медными обмотками (эти расчеты проводились нами ранее [44]). По сравнению с аналогичными устройствами силовой электроэнергетики [64,69,70], полученные весогабаритные показатели и уровень потерь в номинальном режиме не являются экстраординарными, но и оптимизма не вызывают.

Использование ВТСП проводников в большинстве крупных магнитных систем переменного тока пока нецелесообразно из-за высокого уровня гистерезисных потерь. Однако, рассмотренный вид токоограничителя является исключением из этого правила, благодаря следующим особенностям:

а) система выполняется в виде чередующихся слоев первичной и вторичной обмоток, причем расстояние между слоями обмоток делается минимальным (лимитируемым только прочностью электрической изоляции). Это необходимо для обеспечения максимального значения коэффициента связи между обмотками и следовательно, - минимального значения индуктивности в номинальном режиме. При такой конструкции внешнее магнитное поле, то есть поле, создаваемое на двойном слое остальными частями обмотки, практически равно нулю. Следовательно, отсутствует основная компонента гистерезисных потерь – компонента, обусловленная перпендикулярной составляющей внешнего магнитного поля.

б) в плоском слое при отсутствии внешнего магнитного поля основной вклад в величину гистерезисных потерь вносит влияние перпендикулярной составляющей собственного магнитного поля этого слоя. Однако, в рассматриваемом двойном слое и эта составляющая уменьшается, поскольку токи слоев текут во взаимно противоположных направлениях.

Изложенные соображения позволяют рассчитывать на существенное уменьшение гистерезисных потерь. Однако, они носят качественный характер. Количественные данные стало возможным получить лишь благодаря программе, разработанной в рамках настоящего проекта. Ниже приведены результаты соответствующих расчетов.

#### 1. Гистерезисные потери в номинальном режиме.

Схема расположения витков ВТСП обмоток и их характеристики приведены на рис. 3.12 и в таблице 3.4.

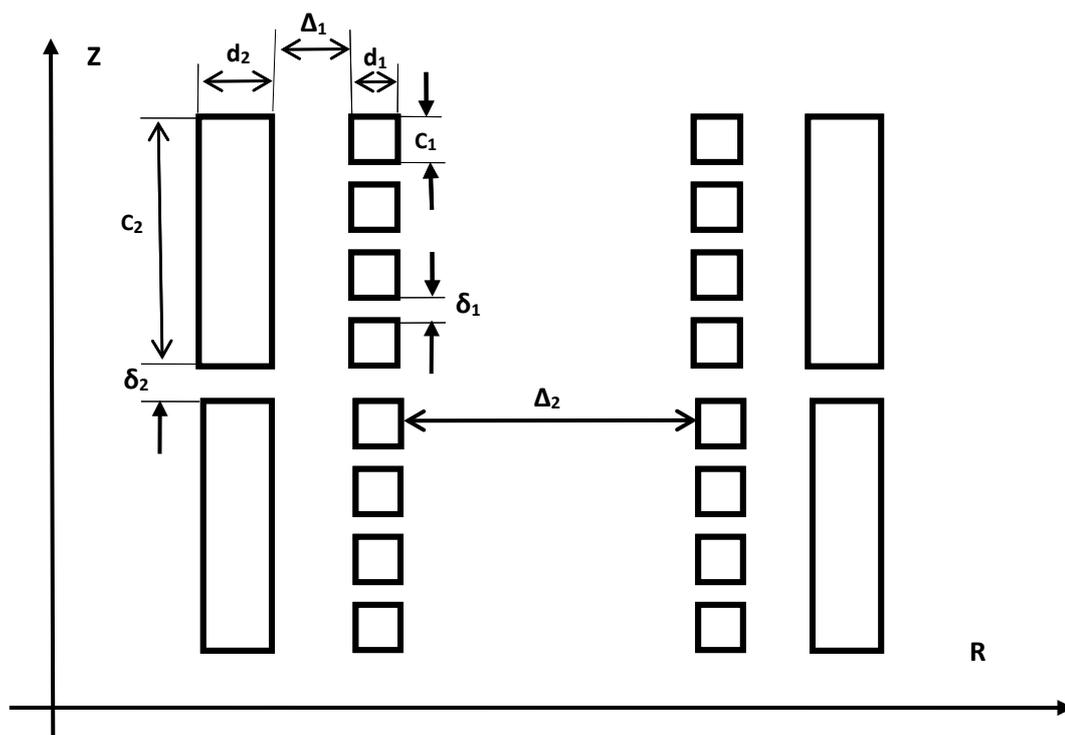


Рис.3.12. Схема обмотки токоограничителя трансформаторного типа.

Таблица 3.4. Геометрические характеристики ВТСП обмотки (вид обмотки – послойная)

Характеристика	Обозначение	величина
Число слоев первичной обмотки	$n_1$	6
Число слоев вторичной обмотки	$n_2$	6
Расстояние между слоями первичной и вторичной обмоток в двойном слое	$\Delta_1$	15 мм
Расстояние между двойными слоями (без учета дополнительного стабилизирующего покрытия)	$\Delta_2$	62 мм
Число витков в слое первичной и вторичной обмоток, соответственно	$m_1, m_2$	32, 8

Расстояние между витками в слоях первичной и вторичной обмоток	$\delta_1, \delta_2$	12 мм
Структура витка первичной обмотки	$d_1 * c_1$	18 ВТСП-лент сечением 0,1*12 мм каждая. Ленты расположены в 6 слоев по 3 ленты в каждом слое. Сечение витка: $d_1 * c_1 = 0,6*36 \text{ мм}^2$ . Критический ток витка – 6 кА
Структура витка вторичной обмотки	$d_2 * c_2$	45 ВТСП-лент сечением 0,1*20 мм каждая. Ленты расположены в 5 слоев по 9 лент в каждом слое. Сечение витка: $d_2 * c_2 = 0,5*180 \text{ мм}^2$ . Критический ток витка – 25 кА

С целью обеспечения сравнимости результатов именно по тепловым потерям, мы практически повторили структуру рассчитанной ранее медной обмотки. Значительно уменьшена только толщина витков, в связи с резким повышением их токонесущей способности. Размеры базовых лент выбраны из стандартной линейки ВТСП лент второго поколения, выпускаемых фирмой SuperPower (США) [45]. Критические токи витков рассчитаны по минимальным значениям критического тока лент из диапазона, гарантируемого изготовителем. Согласно начальным условиям, сигнал на отключение вторичной обмотки подается при мгновенном значении тока сети равном 5,5 кА. Выбранные значения  $J_C$  гарантируют сохранение сверхпроводящего состояния обмоток вплоть до этого значения тока с достаточным запасом. Соотношение количества витков первичной и вторичной обмоток, равное 4:1 (и соответственно, токов обмоток 1:4) принято в связи с необходимостью удовлетворить техническому ограничению по напряжению на выключателе вторичной обмотки. Последнее, в течение всего процесса отключения, не должно превысить 70 кВ.

На рис.3.13 сравниваются результаты расчета гистерезисных потерь для уединенной периодической структуры из витков слоя первичной

обмотки, из витков слоя вторичной обмотки и двойного слоя из витков этих обмоток.

Видно, что эффект уменьшения перпендикулярной составляющей магнитного поля в уединенном слое существенно снижает потери только на витках, расположенных внутри слоя. На торцах слоя, наоборот, перпендикулярная составляющая поля оказывается выше, чем на уединенном витке, несущем тот же ток. Соответственно на торцах слоя потери резко возрастают. Это нивелирует эффект снижения потерь, если количество витков в слое невелико. В двойном слое перпендикулярная составляющая поля подавляется как внутри слоя, так и на его торцах. В результате, потери в любом блоке витков, составляющем период слоя (4 витка фазы 1 и 1 виток фазы 2) оказываются на порядок меньше суммы потерь в композиции из таких же уединенных витков.

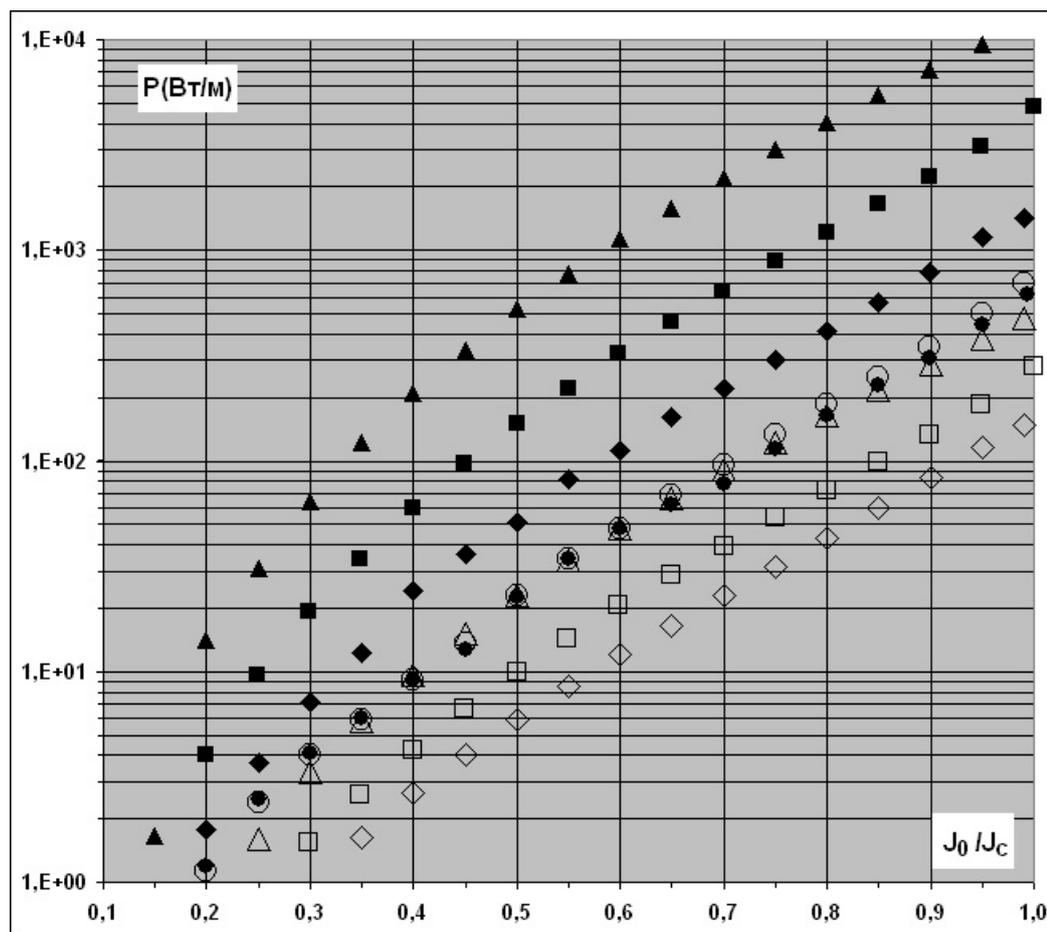


Рис.3.13. Мощность гистерезисных потерь в обмотках различных конфигураций

Потери в расчете на метр длины витка: □ - уединенный виток фазы 1; Δ - торцевой виток в уединенном слое витков фазы 1, расположенных согласно рис.3.12; ◇ - виток внутри уединенного слоя витков фазы 1; ■, ▲, ◆ - то же для витков фазы 2.

Суммарная мощность потерь на метре длины витков двойного слоя (блок витков, состоящий из четырех витков фазы 1 и одного витка фазы 2):

○ – блок, расположенный на торце двойного слоя; ● – блок, расположенный внутри двойного слоя.

Конечной задачей расчетов является определение гистерезисных потерь токоограничителя в номинальном режиме, то есть при амплитудах колебаний тока в первичной обмотке  $J_{01} = J_H \cdot \sqrt{2} = 2,8 \text{ кА}$  и во вторичной  $J_{02} = 4 \cdot J_H \cdot \sqrt{2} = 11,3 \text{ кА}$ . Для обеих обмоток это соответствует практически одинаковой безразмерной амплитуде  $I = J_0 / J_C \approx 0,45$ . Суммируя результаты расчетов по всем двойным слоям обмотки токоограничителя, с учетом незначительного увеличения потерь на торцах слоев, получаем мощность гистерезисных потерь в номинальном режиме работы  $P_H = 5,0 \text{ кВт}$ . Стандартное значение холодильного коэффициента (коэффициента, учитывающего фактически энергетические затраты на отвод тепла, выделяющегося при температуре жидкого азота) равно 8. Таким образом, энергетические затраты на компенсацию гистерезисных потерь в ВТСП токоограничителе составят 40 кВт. Это в 7,4 раза меньше тепловых потерь в соответствующей медной обмотке.

Заметим, что полученное уменьшение гистерезисных потерь достигнуто благодаря двум факторам - использованию двойного слоя и малой величине безразмерной амплитуды колебаний тока. Обе этих особенности обусловлены требованиями к конструкции токоограничителя. То есть уменьшение потерь явилось лишь побочным эффектом. Используя специфику ВТСП обмотки, можно добиться дальнейшего существенного уменьшения потерь. Например, если каждый двойной слой обмотки

заменить двумя параллельно соединенными двойными слоями, имеющими вдвое меньшую толщину, то гистерезисные потери уменьшатся в 4 раза.

## 2. Тепловые потери в режиме «ограничения тока».

Тепловые потери в переходном процессе, возникающем в результате короткого замыкания, не влияют на экономичность токоограничителя. В силу кратковременности процесса (не более 120 мсек). Цель расчета – определить уровень повышения температуры обмотки  $\Delta t$ . Последний не должен превышать величины порядка 10 – 20 градусов для того, чтобы:

а) избежать возможного ухудшения характеристик сверхпроводника, обусловленного быстрым изменением температуры (термическим ударом);

б) гарантировать охлаждение обмотки до температуры восстановления сверхпроводимости за время порядка 5 сек. (промежуток времени между попытками повторного включения).

Переходный процесс состоит из нескольких режимов. Однако, возможно ограничиться только расчетом нагрева первичной обмотки в режиме «ограничения тока», поскольку его продолжительность превышает 95% времени всего процесса. Нагревом вторичной обмотки можно пренебречь, так как ее ток затухает в течение 3-5 мсек.

Результаты расчета токов в первичной обмотки (и следовательно, токов сети) в переходных процессах приведены на рис.3.14.

На рисунке значения тока нормированы на действующий номинальный ток сети (2 кА),  $t^*=t/T$ , где  $T$  – период цикла изменения тока в номинальном режиме ( $T = 20$ мсек). Момент возникновения короткого замыкания характеризуется точкой отрыва кривой изменения тока от зависимости тока сети от времени в номинальном режиме. Остальными точками на кривых помечены моменты смены режимов в переходном процессе.

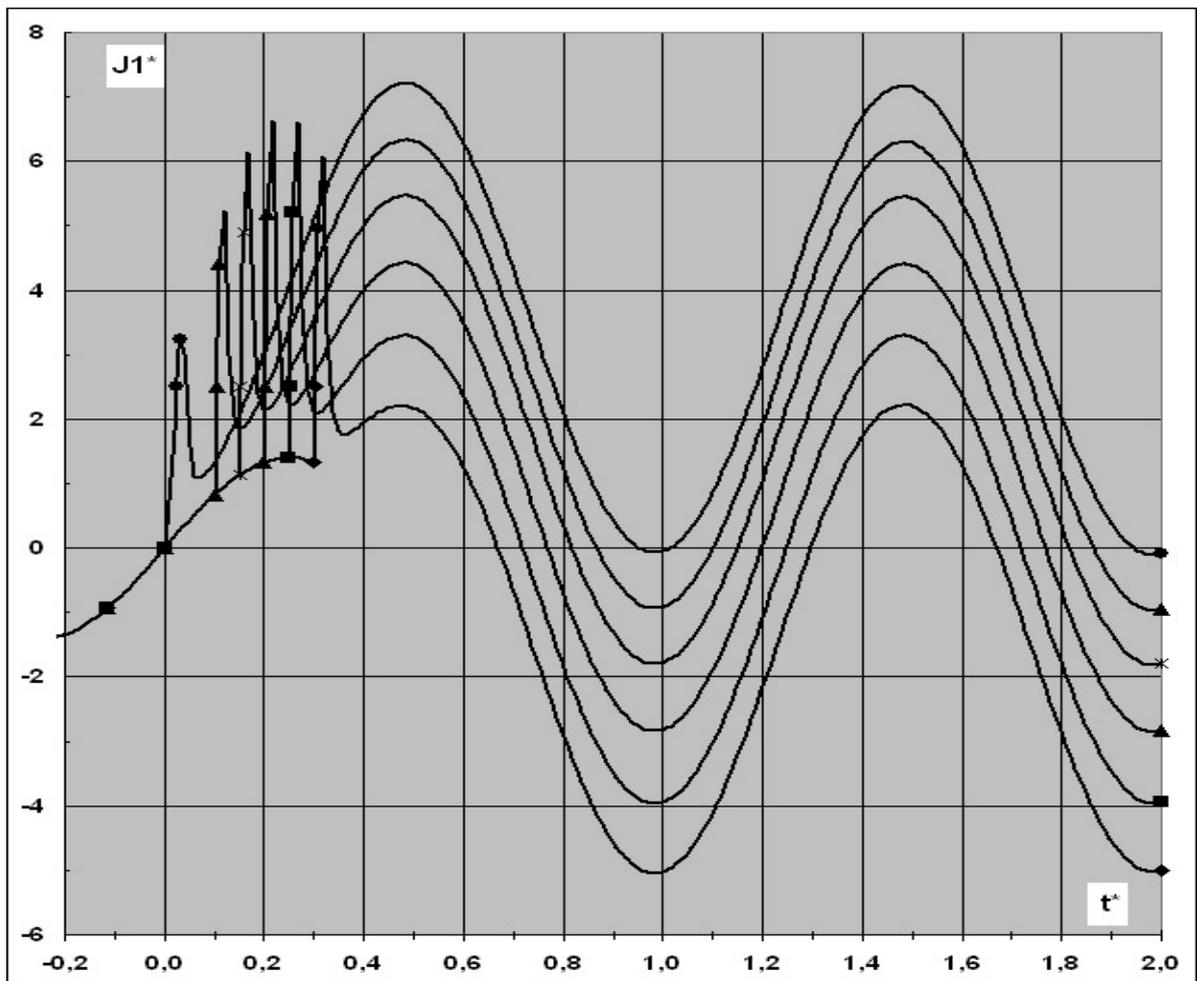


Рис. 3.14. Изменение тока первичной обмотки токоограничителя в переходном процессе

Видно, что изменение тока первичной обмотки в режиме «ограничения тока» с достаточной точностью описывается соотношением:

$$J(t) = J_s + \Delta J \cdot \sin(\omega t), \quad (3.12)$$

где значения  $\Delta J$  и  $J_s$  изменяются в зависимости от момента времени возникновения короткого замыкания. Естественно, что для оценки ситуации необходимо принять наибольшие значения этих величин:  $\Delta J = J_s = 7,25$  кА. Каждая из базовых ВТСП лент представляет собой многослойную конструкцию - формирующая подложка из хастеллоя толщиной 50 мк, слой сверхпроводника толщиной 1 мк, серебряное покрытие сверхпроводника толщиной 2 мк, стабилизирующее медное покрытие толщиной 40 мк, буферные слои, имеющие технологическое назначение общей толщиной

менее 1 мк. Теоретически, в случае превышения  $J_C$  сверхпроводника, в нормальный материал вытесняется лишь часть тока, причем эта часть распределяется между слоями пропорционально их толщине и электропроводности. Однако, точный расчет распределения токов между сверхпроводником и нормальным материалом в нестационарном процессе - проблематичен. Ток подложки мал по сравнению с током в медном покрытии, поскольку электропроводность хастеллоя при азотных температурах в 400 раз меньше электропроводности меди. Токами остальных слоев можно пренебречь в силу их малой толщины. Поэтому, для оценки целесообразно использовать наихудший (но близкий к реальности) вариант – в течение всего режима ток течет только по стабилизирующему медному покрытию.

Интегрируя выражение  $J^2 R$  по времени для зависимости (3.12) и нормируя полученный результат на мощность потерь  $P_H$  (потерь, которые выделялись бы в медном покрытии при протекании по ней синусоидального тока, равного номинальному  $J_H$ ), получим:

$$P_{кз} = P_H \cdot k_p, \quad (3.13)$$

где

$$k_p = \frac{1}{J_H^2} \cdot \left( J_S^2 + \frac{4}{\pi} \cdot J_S \cdot \Delta J + \frac{1}{2} \cdot \Delta J^2 \right). \quad (3.14)$$

При принятых значениях  $\Delta J$  и  $J_S$  значение  $k_p$  максимально:  $k_p = 40$ .

В силу кратковременности рассчитываемого режима, процесс нагрева витков обмотки можно считать адиабатическим. В то же время условия теплообмена между лентами внутри витка и слоями внутри лент остаются идеальными даже при времени процесса порядка нескольких мсек, поскольку велико отношение площади поверхности слоя к его толщине. Поэтому, распределение температуры по сечению витка можно считать изотермическим. С учетом сказанного, уравнение теплового баланса можно записать в виде:

$$k_P \cdot J_H^2 \cdot \rho \cdot \tau / S_{cu} = (c_{cu} \cdot \gamma_{cu} \cdot S_{cu} + c_h \cdot \gamma_h \cdot S_h) \cdot \Delta t, \quad (3.15)$$

где  $\rho = 2,65 \cdot 10^{-9}$  ом\*м – удельное электрическое сопротивление меди при температуре кипения азота,  $\tau = 120$  мсек – время процесса,  $c_{cu}$ ,  $\gamma_{cu}$ ,  $S_{cu}$  – соответственно теплоемкость, плотность и площадь поперечного сечения медного покрытия,  $c_h$ ,  $\gamma_h$ ,  $S_h$  – те же характеристики подложки (учитывать теплоемкость остальных компонент витка не имеет смысла в силу их незначительного сечения). Принимая допустимое повышение температуры витка  $\Delta t = 10^0$ , из (3.15) получим  $S_{cu} = 4,43 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>. Сечение меди в составе лент витка фазы 1 равно  $8,64 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>. Следовательно, для обеспечения необходимой тепловой стабилизации, нужно нанести на виток дополнительный слой меди толщиной 1 мм. Это дополнительное покрытие целесообразно расположить на внешней (по отношению к двойному слою обмотки) стороне витка. Как будет показано в следующем разделе, такое расположение минимизирует тепловые потери в медной матрице в номинальном режиме работы токоограничителя.

### 3. Тепловые потери в матрице при номинальном режиме работы токоограничителя.

Алгоритм расчета матричных потерь, также как и алгоритм расчета электротехнических характеристик сверхпроводника, использует метод индуктивно связанных токовых контуров [46]. Особенность состоит лишь в пренебрежении индуктивным влиянием токов матрицы на распределение электрического поля (что оправдано, поскольку плотность токов в матрице на 3-5 порядков меньше плотности тока в сверхпроводящих элементах). В этом приближении, уравнение, определяющее ток элемента матрицы, имеет вид:

$$L_{Mm} \cdot \frac{dJ_{Mm}}{dt} + \frac{\rho_M \cdot l}{S_M} \cdot J_{Mm} + \sum_{n=1}^N L_{nm} \cdot \frac{dJ_n}{dt} + \frac{d\Phi_{em}}{dt} = U^F. \quad (3.16)$$

Здесь  $J_{Mm}$ ,  $L_{Mm}$ ,  $S_M$  - соответственно ток элемента матрицы, имеющего номер  $m$ , его собственная индуктивность и площадь поперечного сечения,  $L_{nm}$  -

взаимная индуктивность этого элемента и сверхпроводящего элемента  $n$ ,  $\Phi_{em}$  - поток внешнего магнитного поля, сцепленный с контуром, образованным осью кабеля и осью поперечного сечения элемента  $m$ . Уравнения (3.16) для каждого элемента матрицы интегрируются индивидуально, то есть приращения токов в сверхпроводящих элементах  $dJ_n$  и значение напряжения фаз  $U^F$  вычисляются заранее при расчете характеристик сверхпроводящих элементов и используются как аргументы. Мощность и величина тепловых потерь в матрице ( $P_M$  и  $Q_M$ ) вычисляются, естественно, путем суммирования мощностей по элементам матрицы и интегрирования результата по времени:

$$P_M = \sum_m \frac{\rho_M \cdot l}{S_M} \cdot J_{Mm}^2, Q_M = \int P_M \cdot dt. \quad (3.17)$$

Схема расчетов одинакова как для однородной, так и для комбинированной матрицы. Особенность последнего варианта состоит лишь в изменении удельного сопротивления матрицы  $\rho$  по ее сечению.

Из приведенных ранее данных по электропроводности и размерам слоев, образующих витки токоограничителя, следует, что расчеты достаточно провести только для потерь в меди. Рисунки 3.14-3.15 иллюстрируют распределение плотности тока по слоям медного покрытия лент и слоям дополнительного медного покрытия в витке первичной обмотки токоограничителя при номинальном режиме его работы. Предполагается, что ленты в слоях витка ориентированы подложкой внутрь двойного слоя (в сторону витков вторичной обмотки). Соответственно, слой меди располагается с противоположной стороны (то есть, отделен от промежутка двойного слоя сверхпроводящим покрытием ленты). В бесконечном бифилярном сверхпроводящем слое проникновение тока в сверхпроводник начинается с внутренних сторон слоя. При этом внешние, свободные от тока области, остаются экранированными от изменяющегося магнитного поля.

В реальной конструкции картина остается практически такой же. То есть, сначала насыщается слой №1 (ток в слое достигает критического значения), затем начинается проникновение тока в слой №2 вплоть до его насыщения и т.д. Отличие состоит лишь в появлении незначительных токов на периметре витка, компенсирующих наличие зазоров между витками.

Кроме того, из-за дискретного расположения сверхпроводящих слоев наблюдается незначительное проникновение изменяющегося магнитного поля в промежутки между слоями сверхпроводника. Эти особенности проникновения тока определяют и характер кривых, представленных на рис.3.14-3.15. В номинальном режиме работы, ток витка не превышает  $0,45 J_C$ . Поэтому, слои сверхпроводника № 4 и 5 остаются ненасыщенными в течение всего цикла изменения тока, слои 3 и 6 насыщаются лишь частично. Эти сверхпроводящие слои эффективно экранируют от изменяющегося поля слои меди, находящиеся между ними. Поэтому, токи в слоях меди №, 4 и 5 – минимальны.

На рисунке 3.14:  $j_m$  - средняя плотность тока в слое [А / мм<sup>2</sup> ]. Транспортный ток витка изменяется по закону:  $J = 0,45 \cdot J_C \cdot \sin(\omega \cdot t)$ ,  $f = \omega / 2\pi = 50$  Гц. Интервал времени  $0 \leq t \leq 0,005$  - фаза первоначального проникновения тока. При  $t > 0,005$  - установившийся циклический режим изменения тока, ●, ■, ○, - соответственно слои медного покрытия лент с № 3 по № 6 (нумерация начинается со слоя, ближайшего к витку вторичной обмотки).

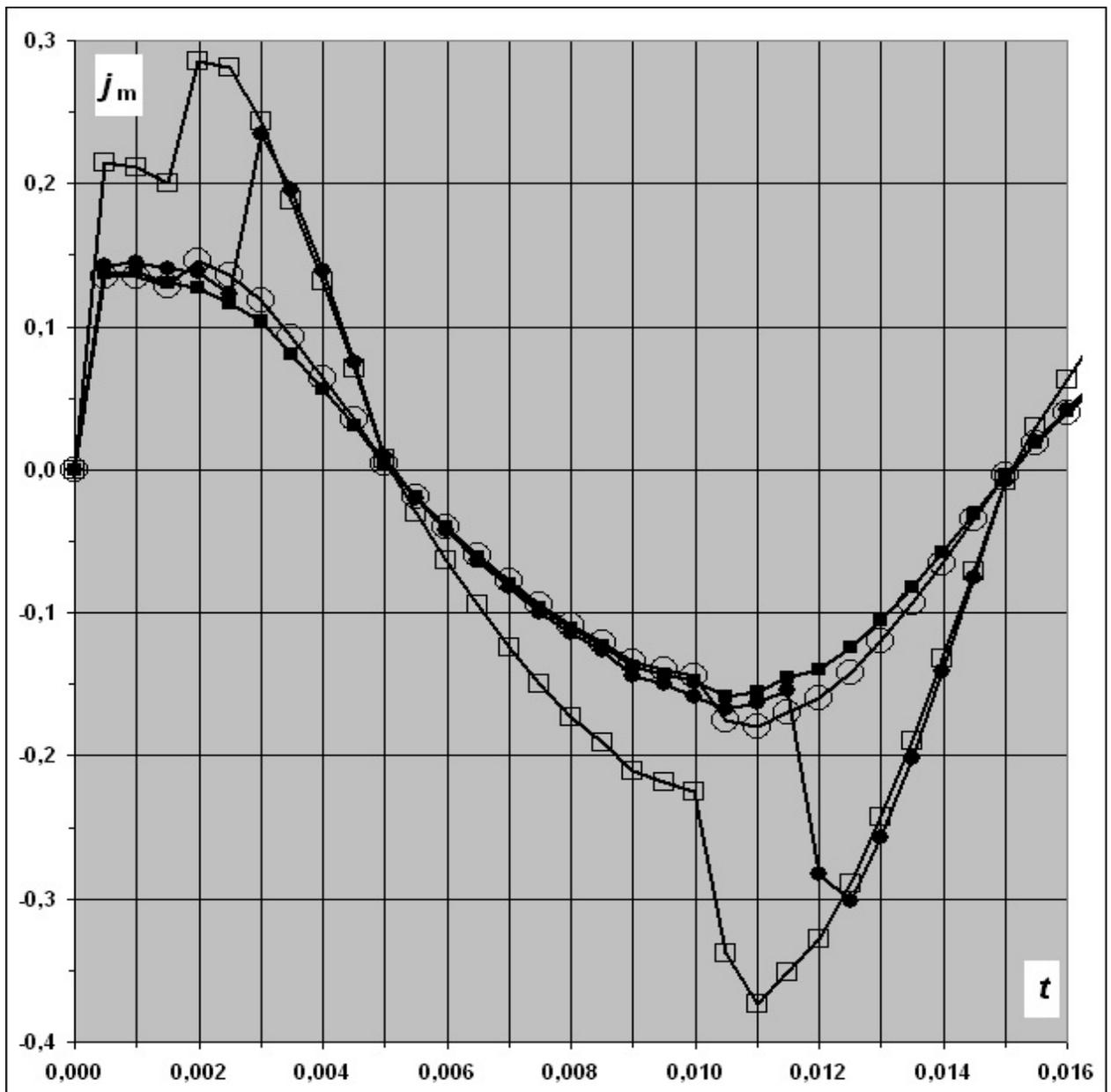


Рис. 3.14. Распределение токов по слоям меди в витке первичной обмотки токоограничителя при номинальном режиме его работы.

На рисунке:  $j_m$  - средняя плотность тока в слое [А / мм<sup>2</sup>]. Режим изменения транспортного тока - тот же, что и на рис.3.14, ●, ○ - соответственно слои медного покрытия лент № 1 и № 2. (нумерация начинается со слоя, ближайшего к витку вторичной обмотки), ■ - слои дополнительного медного покрытия, расположенные на расстояниях соответственно 0,25 мм и 0,75 мм от внутренней стороны покрытия (стороны, прилежащей к слою медного покрытия лент №6).

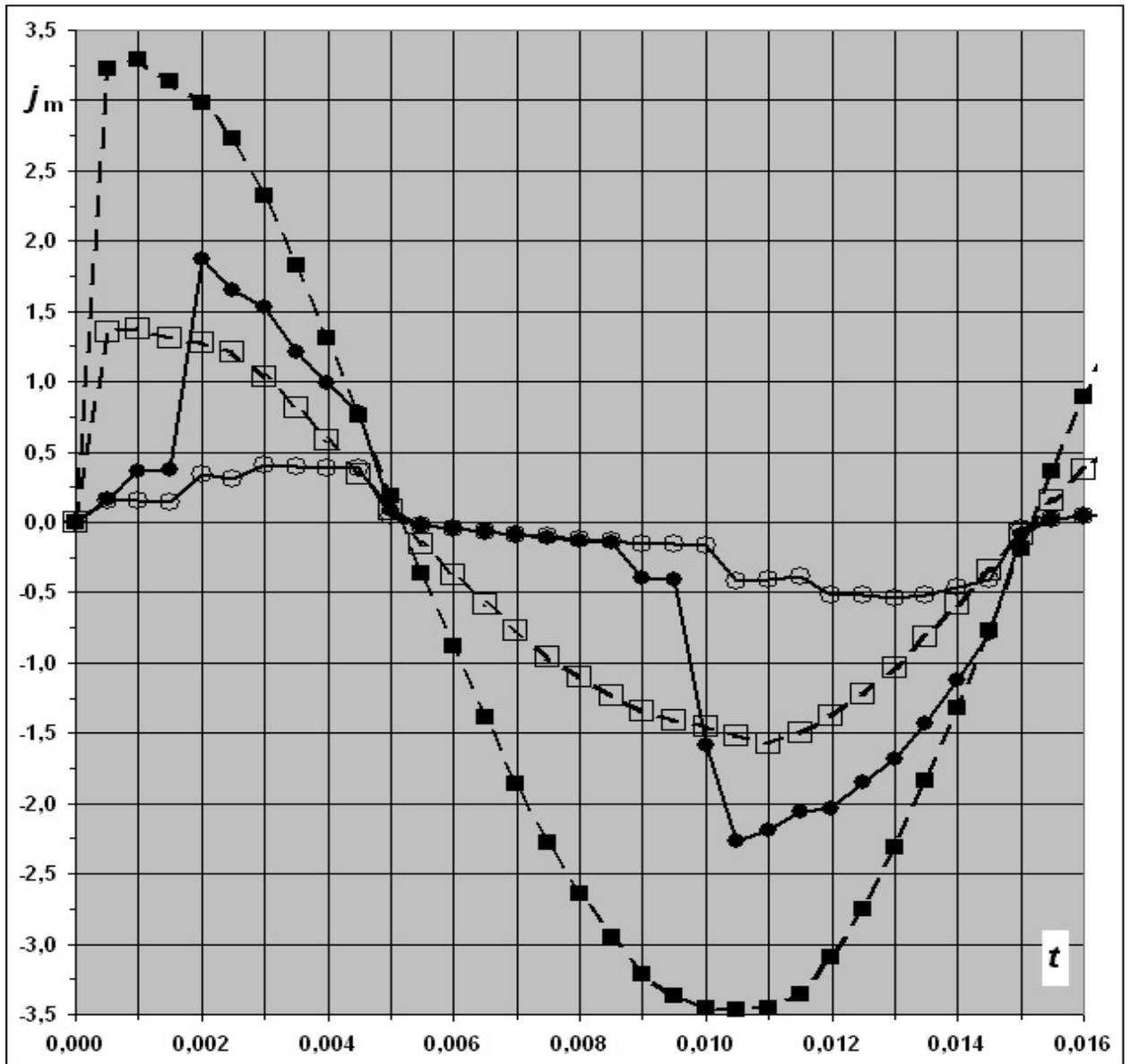


Рис. 3.15. Распределение токов по слоям меди в витке первичной обмотки токоограничителя при номинальном режиме его работы.

В течение всего цикла изменения тока, условия экранирования этих слоев качественно не меняются. Поэтому, зависимости  $j_m$  от времени близки к синусоидальным и опережают по фазе транспортный ток на угол не многим меньший  $\pi/2$ . Экранирование слоя меди №1 прекращается как только насыщается сверхпроводник, относящийся к этому слою. С этого момента начинается быстрый рост тока в слое. Участок цикла, на котором оказывается насыщенным и слой сверхпроводника №2 значительно меньше.

Поэтому, увеличение тока в слое меди №2 менее значительно и занимает меньший промежуток времени. Аналогично объясняется поведение кривых для слоев № 3 и 6. Слои дополнительного медного покрытия экранируются лишь с одной (внутренней) стороны, причем эффективность экранирования падает по мере удаления от сверхпроводящих слоев. Соответственно, наводимый в них ток оказывается на порядок выше и практически не реагирует на моменты перехода насыщенной зоны от одного сверхпроводящего слоя к другому. Распределение матричных токов по высоте слоев, в силу конечности витка, также неоднородно – токи увеличиваются в направлении от середины слоя к его торцам. Поэтому, основной вклад в величину потерь вносят токи, наводимые на торцах слоев. Результаты расчета для витков вторичной обмотки аналогичны. Однако, благодаря отсутствию дополнительного медного покрытия, матричные потери во вторичной обмотке значительно меньше.

В результате расчетов получено: мощность матричных потерь в обмотке токоограничителя в номинальном режиме работы составляет  $P_m = 210$  Вт. В том числе, мощность потерь в медном покрытии лент - 40 Вт., мощность потерь в дополнительном медном покрытии витков первичной обмотки – 170 Вт. Эти потери значительно меньше гистерезисных и слабо влияют на общие энергетические затраты. Заметим, что при расположении дополнительного медного покрытия на внутренней стороне двойного слоя результат был бы значительно хуже, поскольку эта область не экранирована от изменяющегося магнитного поля.

### **Выводы по главе 3:**

1. Исследованы сверхпроводящие токоограничители индуктивного типа. Произведено сравнение токоограничителей трансформаторной и автотрансформаторной схем соединения обмоток. Разработаны методики расчётов токоограничителей обоих типов.

2. Показано, что наиболее удачной является конструкция трансформатора с симметрично чередующейся обмоткой при числе групп больше или равной четырём.

3. Необходимо отметить, что токоограничитель автотрансформаторного типа выглядит предпочтительнее, так как вес обмоток снижается по сравнению с токоограничителем трансформаторного типа.

4. Использование сверхпроводящих обмоток в токоограничителях позволяет снизить расход провода, его масса сокращается более чем в 30 раз.

5. Проведен анализ изменения потерь от конструкции сверхпроводящих обмоток токоограничителей. Показано, что основной вклад вносят гистерезисные потери. При этом использование сверхпроводника позволяет снизить электрические потери более чем в 7 раз.

6. Высокий уровень гистерезисных потерь делает нецелесообразным использование сверхпроводников в магнитных системах многих типов. Однако на токоограничители трансформаторного и автотрансформаторного типов это ограничение не распространяется.

#### **4 Короткие сверхпроводящие кабельные линии постоянного тока**

Рассмотрим электропередачу постоянного тока, связывающую две различные системы (см. главу 1). В этом случае режим электропередачи определяется совместной работой выпрямителя и инвертора.

Выпрямительные и инверторные подстанции электропередач постоянного тока, как правило, состоит из нескольких преобразовательных мостов. Этому есть ряд причин, одна из которых заключается в необходимости обеспечения 12-и фазного преобразования с целью улучшения гармонического состава тока.

В современных электропередачах постоянного тока на шинах переменного тока, через которые осуществляется связь с системой, как правило, устанавливаются резонансные фильтры высших гармонических составляющих, настроенных на частоту основных гармоник, а также широкополосные фильтры. В результате этого напряжение на шинах становится синусоидальным, симметричным и взаимное влияние мостов исчезает. В этом случае мосты преобразовательной подстанции могут работать независимо друг от друга, однако, благодаря действию системы автоматического регулирования сохранять идентичность режима отдельных мостов.

Поскольку цепь постоянного тока гальванически не связана с сетью переменного тока, то для фиксации потенциала мостов преобразовательной подстанции одна из точек на стороне постоянного тока заземляется. В зависимости от того, какая точка заземлена, и от способа возврата тока различают две разновидности схем выполнения электропередач – униполярную и биполярную.

В униполярной передаче постоянного тока заземлён один из полюсов и линия имеет лишь один провод, изолированный от земли. Второй провод или отсутствует вообще, или заземлён с двух сторон линии. В первом случае возврат тока происходит через землю. Второй случай применяется тогда,

когда необходимо исключить растекание тока по земле, например при вводах электропередачи в крупные города. В этом случае передача осуществляется по одножильному кабелю, роль обратного проводя играет земля.

В биполярных передачах заземлены средние точки обеих преобразовательных подстанций, а полюсы изолированы. Это позволяет разделить передачу на две независимые полуцепи. При равной нагрузке полуцепей ток в земле равен нулю, если пренебречь незначительным током небаланса. Это свойство повышает надежность передачи, поскольку при повреждении одного из полюсов передача в целом не выходит из работы, так как вторая полуцепь продолжает работать с возвратом тока через землю.

Сверхпроводящие линии как постоянного, так и переменного тока уже долгое время являются предметом пристального изучения ученых. Первые такие линии были построены с использованием низкотемпературных сверхпроводников [65,66]. С течением времени и совершенствованием технологий, а особенно в связи с открытием высокотемпературной сверхпроводимости, такие линии в качестве опытных и предпромышленных образцов начали производить по всему миру [67,68,79-82,86-91].

Следует отметить, что ограничение токов КЗ происходит во всех случаях электропередач постоянного тока, и последние рассматриваются как одно из средств решения этой сложной инженерной проблемы.

#### **4.1 Токонесущая способность сверхпроводящего униполярного кабеля**

Как уже говорилось ранее, критическая плотность тока существенно зависит от локального магнитного поля  $B$  [87]. Количественно эту зависимость можно описать следующей моделью [27]:  $j_c = \alpha / |B^\gamma|$ , где  $\alpha$  и  $\gamma$  – константы, зависящие от свойств сверхпроводника. Поскольку распределение локального магнитного поля по сечению кабеля зависит от его конструктивного исполнения, последнее определяет и эффективность использования сверхпроводника.

В случае, когда прямой и обратный кабели удалены друг от друга (биполярная передача с использованием униполярного кабеля) или просто униполярная передача, значение  $B$  определяется только собственным током кабеля.

Распределение локального магнитного поля по сечению кабеля описывается уравнением:

$$\text{rot}B = \mu_0 \cdot j, \quad (4.1)$$

Которое в цилиндрической системе координат, с учётом модели критического состояния принимает вид:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d}{d\rho}(\rho B) = \mu_0 \frac{\alpha}{|B|^\gamma}, \quad (4.2)$$

Решая (4.2), получим среднюю (рабочую) плотность тока по сечению кабеля:

$$j_p = \frac{J}{\pi \cdot R^2} = \frac{2}{\mu_0} \cdot \left[ \frac{\gamma+1}{\gamma+2} \cdot \mu_0 \cdot \alpha \right]^{\frac{1}{\gamma+1}} \cdot R^{\frac{\gamma+2}{\gamma+1}-2}. \quad (4.3)$$

Итак, средняя плотность тока линейна относительно  $R^{\frac{\gamma+2}{\gamma+1}-2}$ . На рисунке 4.1 показана зависимость  $j_p = (j_c \cdot \alpha^{-\frac{1}{\gamma+1}})^{1/8}$  от  $R_p = (R^{\frac{\gamma+2}{\gamma+1}-1})^{1/8}$ .

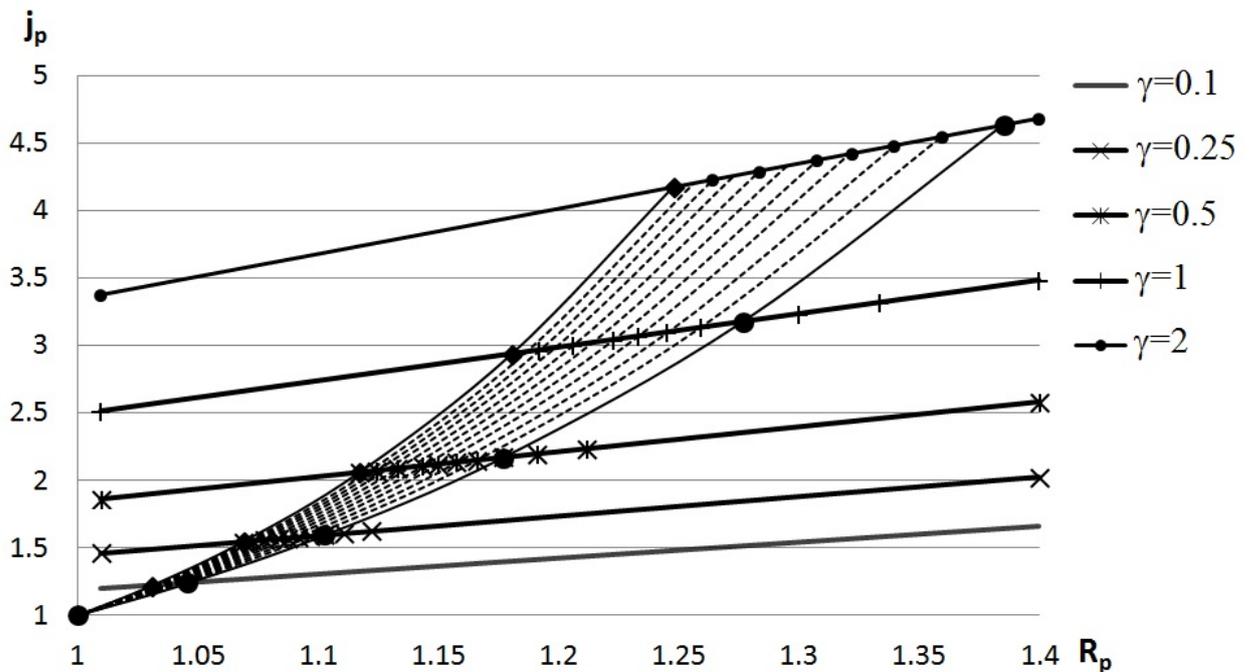


Рис. 4.1. Зависимость средней плотности тока кабеля от его геометрии и параметров критического состояния

Как видим из рис. 4.1., с увеличением номинального тока (и, следовательно, радиуса кабеля  $R$ ) растёт величина  $B$  и, соответственно, падает значение средней критической плотности тока  $j_c = J_c/S$  (здесь  $J_c$  – критический ток кабеля,  $S$  – площадь поперечного сечения). Для удобства анализа выбрана такая система координат в которой связь между расчетными значениями критической плотности тока и радиуса ( $j_p$  и  $R_p$ ) при  $\gamma = const$  является линейной. Пунктирными линиями представлены зависимости, рассчитанные при условии  $R = const$ . Они построены с равным шагом  $\Delta R = 0,005$  м.

#### **4.2 Токонесущая способность сверхпроводящей кабельной линии**

В биполярном кабеле прямая и обратная линии совмещены в одной конструкции. Обычно, она представляет собой две соосные цилиндрические секции, токи которых текут во взаимно противоположных направлениях. Ток каждой секции по модулю равен току в соответствующем униполярном кабеле. При  $\gamma = 0$  площади сечения секций равны между собой и не отличаются от площади сечения униполярного кабеля, но при увеличении  $\gamma$  необходимая площадь поперечного сечения внешней секции уменьшается. Это связано с размагничивающим влиянием поля внутренней секции на поле внешней, благодаря которому во внешней секции снижается локальное магнитное поле и возрастает критическая плотность тока. Таким образом, использование уже этого простейшего варианта конструкции, позволяет снизить расход сверхпроводника. Дальнейшей экономии материала можно достичь, разбивая сечение кабеля на несколько соосных секций, которые подключаются так, что токи в соседних секциях текут во взаимно противоположных направлениях. Схема такого кабеля представлена на рис. 4.2.

Конструкция секционированного ВТСП кабеля отличается от конструкции цилиндрического ВТСП токоограничителя резистивного типа. Главное отличие состоит в том, что в токоограничителе только центральная и

внешняя секции соединены параллельно между собой, а все остальные последовательно относительно друг друга (см. рис. 2.3). В случае ВТСП кабеля все секции с током одного направления соединены параллельно между собой. Таким образом, в кабеле мы получаем две группы параллельно соединенных секций – одна для токов прямого направления, вторая – для токов обратного направления.

По технологическим причинам, в центре кабеля может располагаться несверхпроводящий стержень (формер) радиусом  $R_0$ . Кроме того, секции разделяются зазорами, используемыми для электрической изоляции и (при необходимости) для формирования охлаждающих каналов.

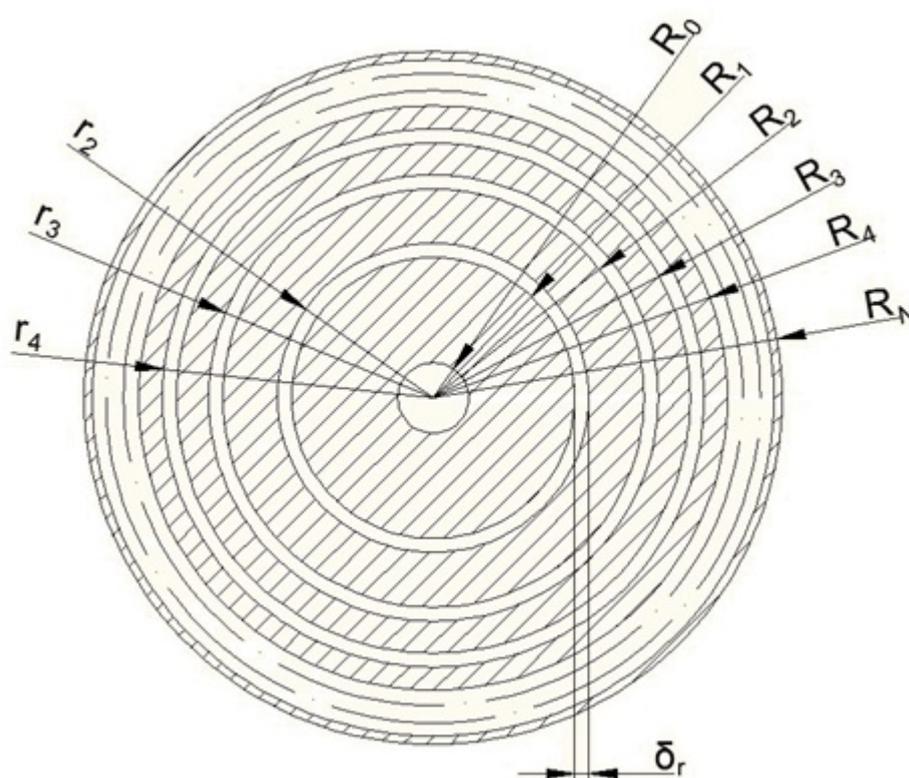


Рис. 4.2. Модель секционированного кабеля.  $R_n$ ,  $r_n$  – внешний и внутренний радиусы секции  $n$ ,  $\delta_r$  – зазор между секциями,  $R_0$  – радиус формера,  $R_N$  – габаритный радиус кабеля

### 4.3 Методика расчета секционированного кабеля

Распределение локального магнитного поля по сечению сверхпроводника описывается уравнением:

$$\operatorname{rot} B = \mu_0 \cdot j_C, \quad (1)$$

которое, в цилиндрической системе координат, с учетом модели критического состояния [27], принимает вид:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d}{d\rho} (\rho \cdot B) = \mu_0 \cdot \frac{\alpha}{|B|^\gamma}. \quad (2)$$

Решая (2), получим:

$$B_n(\rho) = \frac{\operatorname{sgn}(A_n)}{\rho} \cdot \gamma + 1 \sqrt[\gamma]{|A_n|}, \quad (3a)$$

$$A_n = (r_n \cdot B(r_n))^{\gamma+1} + \operatorname{sgn}(J_n) \cdot \frac{\gamma+1}{\gamma+2} \cdot \mu_0 \cdot \alpha \cdot (\rho^{\gamma+2} - r_n^{\gamma+2}). \quad (3b)$$

Здесь:  $B_n(\rho)$  - поле секции  $n$  в точке сверхпроводника с текущей координатой  $\rho$ ,  $B(r_n)$  - поле на внутреннем радиусе секции  $n$ ,  $\operatorname{sgn}(J_n)$  - функция знака тока в секции  $n$ :  $\operatorname{sgn}(J_n) = 1$  при  $J_n \geq 0$  и  $\operatorname{sgn}(J_n) = -1$  при  $J_n < 0$  и  $\operatorname{sgn}(A_n)$  - функция знака  $A_n$ . Значение  $B(r_n)$  рассчитывается из закона полного тока, примененного к секциям, внутренним по отношению к рассчитываемой:

$$B(r_n) = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi \cdot r_n} \cdot \sum_{k=1}^{n-1} J_k. \quad (3c)$$

Расчет по (3) начинается с внутренней секции, для которой значения внутреннего и внешнего радиусов задаются как аргументы, а  $B(r_1) = 0$ . Ток секции равен:

$$J_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{\mu_0} \cdot B(R_1). \quad (4)$$

Этого значения достаточно для определения начальной величины поля в следующей секции по (3с) и, следовательно, для расчета распределения поля в ней по (3а), (3б). Расчет следующих секций выполняется аналогично с учетом особенностей описанных ниже:

а) При  $n \neq 1$  для расчета тока секции вместо (4) используется более общее соотношение, которое также следует из закона полного тока:

$$J_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_n}{\mu_0} \cdot [B(R_n) - B(r_n)] + \frac{R_n - r_n}{r_n} \cdot \sum_{k=1}^{n-1} J_k \quad (5)$$

б) Значения внешних радиусов секций с номерами от  $n = 2$  до  $n = N-1$  подбираются в процессе расчета из условия  $J_n = (-1)^{n+1} \cdot 2 \cdot J_1$ .

в) Ток последней секции должен быть равен  $J_N = (-1)^{N+1} \cdot J_1$ .

Условие (б) обеспечивает минимизацию значения среднего магнитного поля в секции и, следовательно – максимум средней критической плотности тока. Условие (с) позволяет получить значение индукции магнитного поля на внешней границе кабеля  $B(R_N) = 0$ .

#### 4.4 Результаты расчетов

Общее представление об увеличении плотности тока за счет секционирования дает рис. 4.3, на котором представлены результаты расчетов, выполненных в пренебрежении размерами формера и размерами зазоров между секциями ( $R_0=r_1=0$  и  $\delta_f=0$ , то есть  $R_{n-1}=r_n$ ).

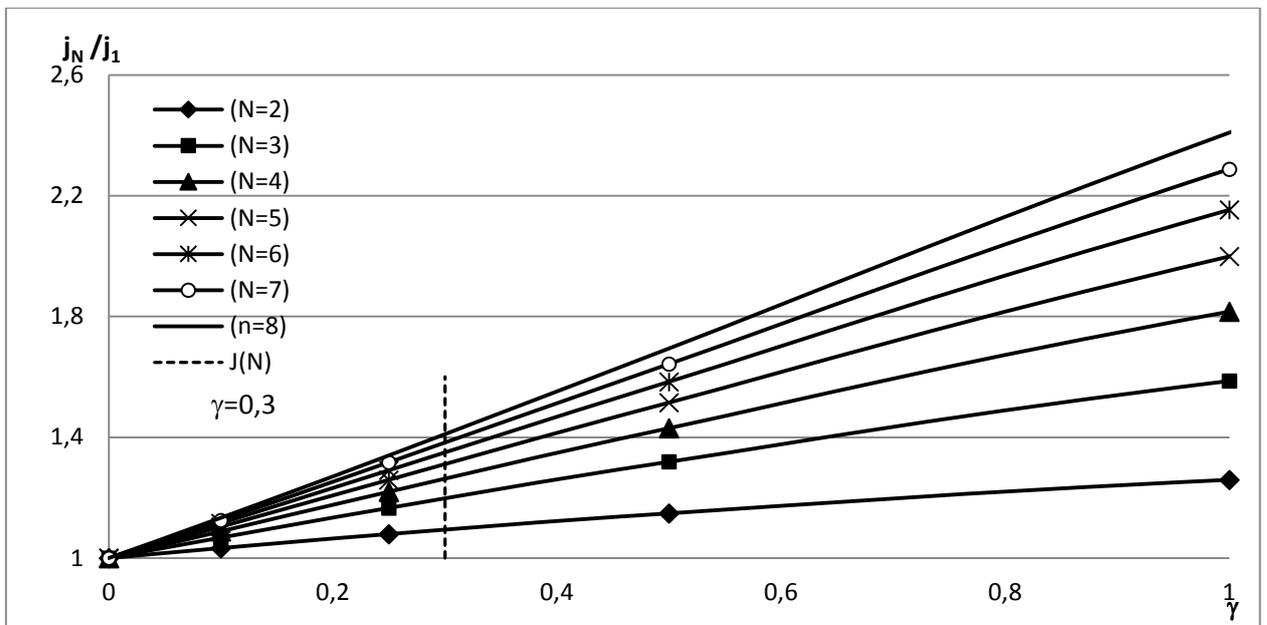


Рис. 4.3. Отношение средней плотности тока в секционированном биполярном кабеле, состоящем из  $N$  секций,  $j_N$  к плотности тока в униполярном кабеле  $j_1$ . Пунктиром обозначении прямая, на которой лежит зависимость  $j_N/j_1$  для  $\gamma=0,3$ .

Влияние геометрических размеров кабеля (габаритного размера, количества секций и величины зазоров между ними) на его пропускную способность иллюстрируются на рис. 4.4.

Как показали расчеты – ток в кабеле растет с увеличением количества секций. Увеличение габаритного размера кабеля также ведет к увеличению тока, однако, плотность тока при этом снижается. В случае увеличения зазоров между секциями, плотность тока возрастает, но полный ток кабеля при этом снижается.

В качестве примера расчета конкретной модели кабеля, на рис 4.5 приведены результаты расчета распределения магнитного поля секционированного кабеля. На рис. 4.5(а) представлен кабель со следующими характеристиками:  $N=5$ ,  $\gamma=1$ ,  $\alpha = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{Тл}\cdot\text{А}}{\text{м}^2}$ , радиус формера  $R_0=5$  мм, толщина изоляции между секциями  $\delta_r=0,63$  мм. Как видим, суммарное сечение материала в рассчитанном кабеле составило  $S_{\Sigma}(N=5)=443,6$  мм<sup>2</sup>. Сечение материала в двухсекционном кабеле при тех же

характеристиках составило бы  $S_{\Sigma}(N=2) = 1261,8 \text{ мм}^2$ , а необходимая площадь сечения в случае биполярное передачи, реализованной посредством двух униполярных кабелей, была бы  $2S_U = 1341,3 \text{ мм}^2$ . При расчете кабеля рис. 4.5(б) принимались характеристики сверхпроводника, соответствующие материалу, производимому фирмой Bruker [47]:  $\gamma=0,3$ ;  $\alpha = 2,124 \cdot 10^6 \frac{\text{Тл} \cdot \text{А}}{\text{м}^2}$ . Количество секций кабеля  $N=5$ , радиус формера  $R_0=5 \text{ мм}$ , технологический зазор  $\delta=0$ .

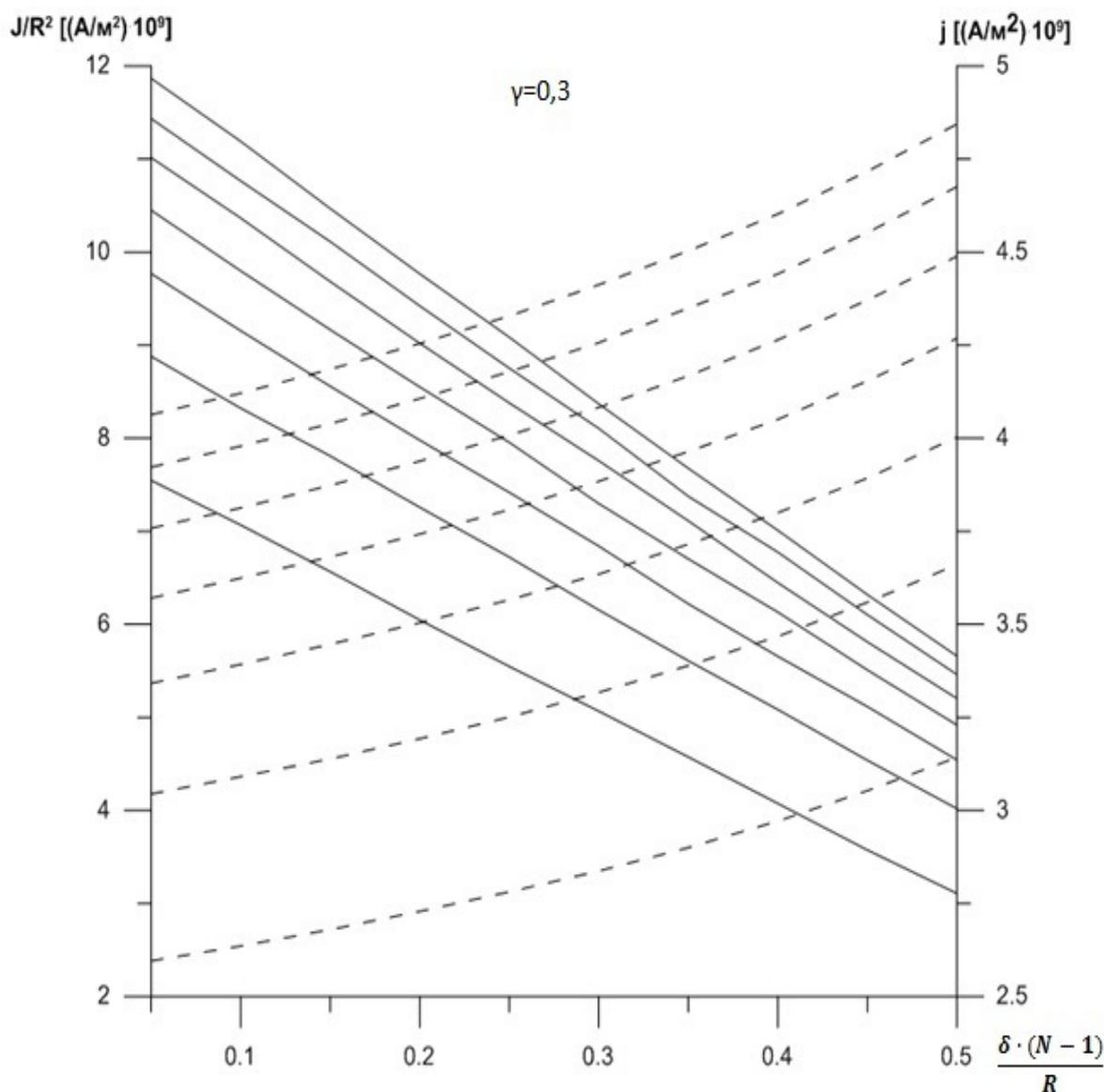


Рис. 4.4. Полный критический ток кабеля  $J_c$  [А] и средняя критическая плотность тока по его сечению  $j_c$  [кА/м<sup>2</sup>] при количестве секций от  $N=2$  (нижние кривые) до 8 (верхние кривые) при небольших зазорах  $\delta$ .

—  $J_c$ ;    ----  $j_c$

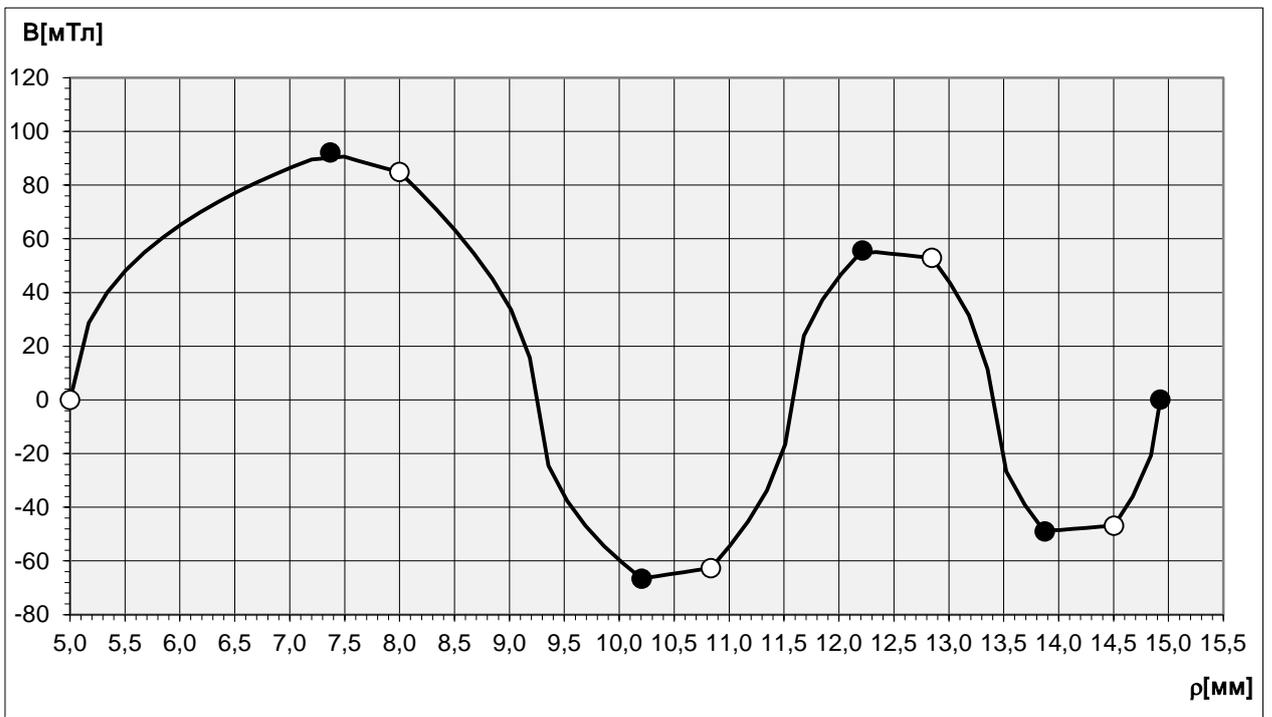


Рис.4.5(а). Распределение магнитного поля по сечению кабеля  $J_c=13,6$  кА,  $R_0 = 5$  мм,  $\delta=0,63$ мм. ○ – начала секций, ● – окончания секций

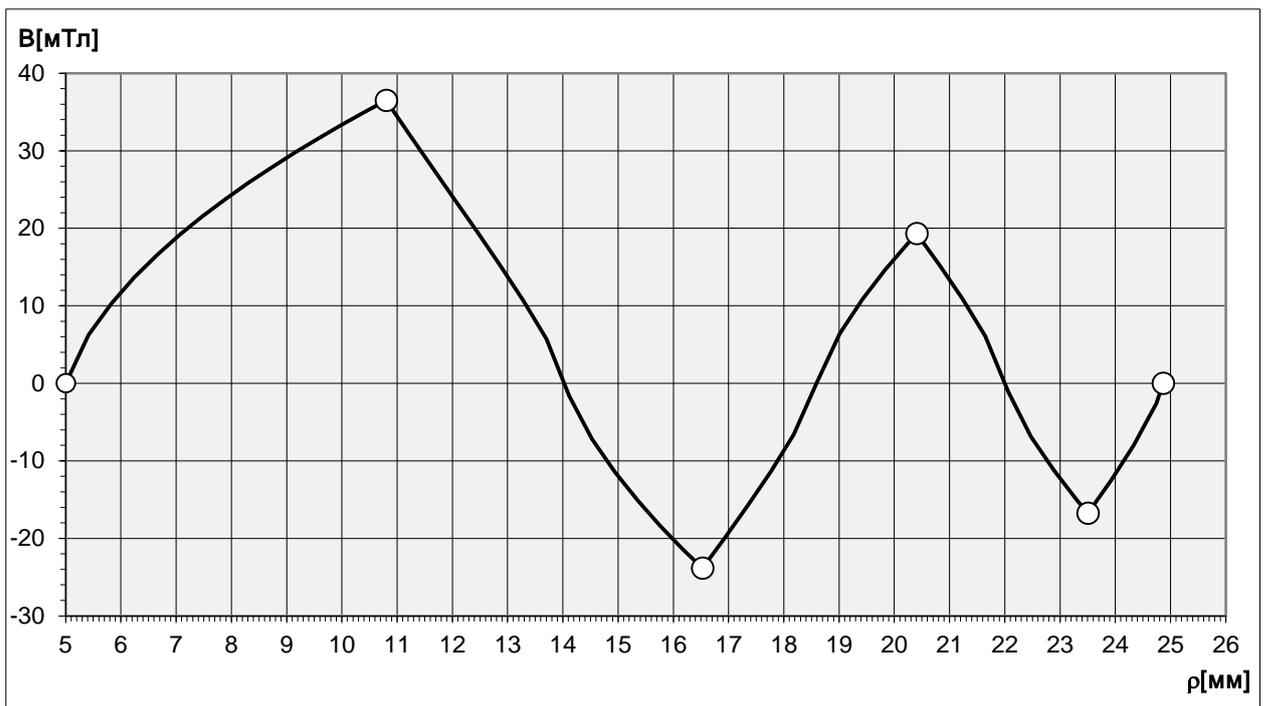


Рис.4.5(б). Распределение магнитного поля по сечению кабеля  $J_c=7,88$  кА,  $R_0 = 5$  мм,  $\delta = 0$ . ○ – границы секций

Общий характер зависимости экономии материала от числа секций и параметра  $\gamma$  по сравнению с вариантом биполярной передачи энергии двумя униполярными кабелями иллюстрируется на рис.4.6. Данные графика рассчитаны в предположении отсутствия формера ( $R_0=0$ ) и отсутствия зазоров между секциями. Влияние этих предположений на результаты не существенно, если суммарная площадь зазоров и формера не превышает 5% общей площади сечения кабеля.

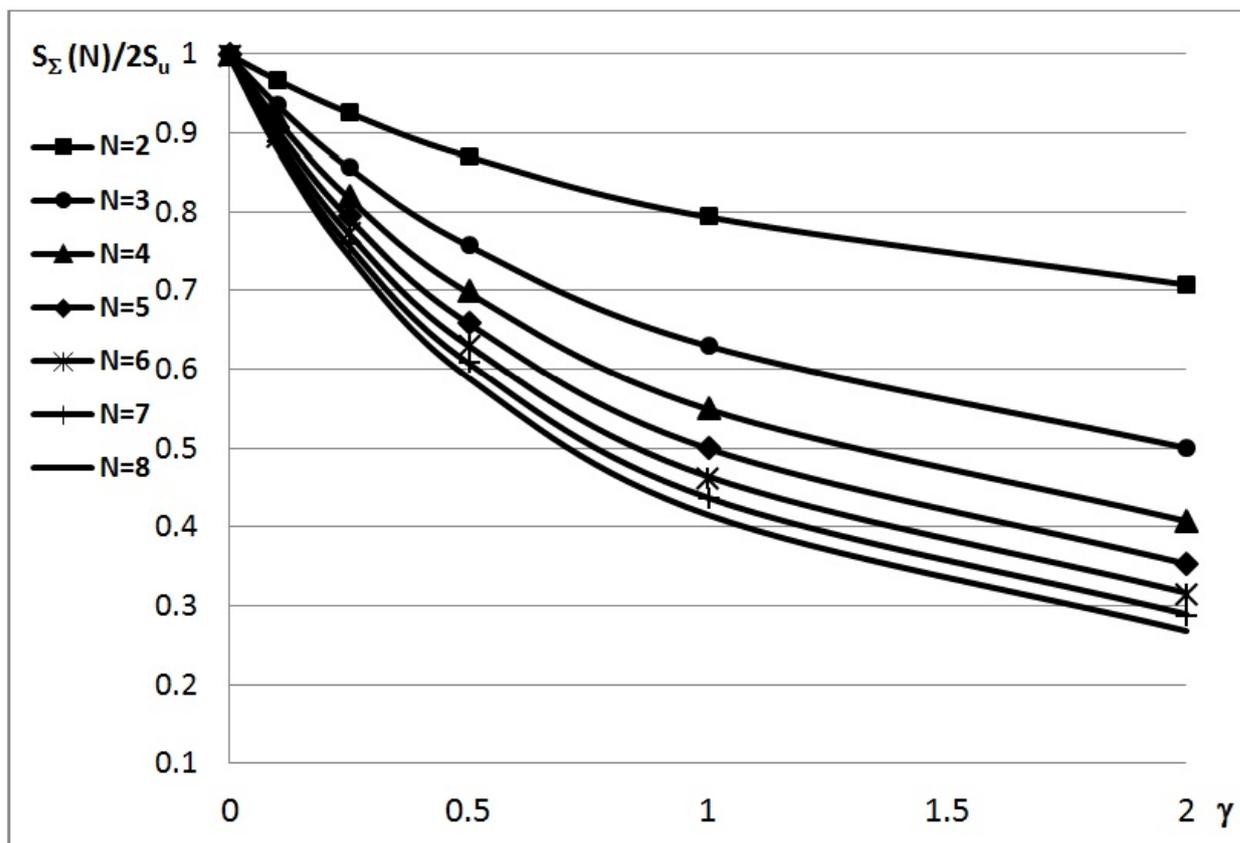


Рис.4.5. Отношение расхода сверхпроводящего материала в секционированном кабеле к расходу материала в варианте биполярной передачи с использованием двух униполярных кабелей

Также по результатам расчетов были разработаны и запатентованы модели секционированного кабеля на различное количество секций [49-51].

#### 4.5 Методика расчета гистерезисных потерь

Поскольку конструкция секционированного ВТСП кабеля отличается от конструкции цилиндрического ВТСП ограничителя тока резистивного типа только характером соединения секций: в отличие от последовательно-

параллельного подключения секций в случае токоограничителя в ВТСП кабеле секции прямого и обратного направления тока соединяются параллельно между собой, методика расчета гистерезисных потерь является аналогичной методике, представленной в главе 2.2. На рис. 4.6 представлена схема включения секций прямого и обратного направления токов секционированного кабеля в полуцепи передачи постоянного тока на примере пятисекционного кабеля.

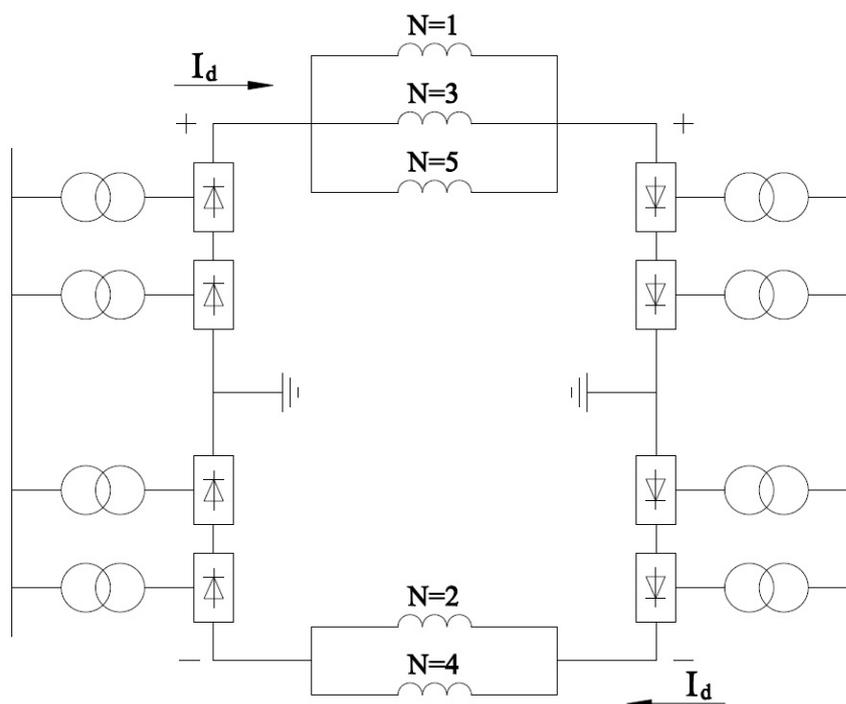


Рис. 4.6. Электрическая схема соединения секций секционированного ВТСП кабеля

#### 4.6 Расчет гистерезисных потерь в секционированном ВТСП кабеле

Рассмотрим характер проникновения тока в секционированный ВТСП кабель на основе конструкции, состоящей из пяти секций. Как уже было описано выше – секции с одинаковым направлением тока соединены параллельно, то есть, для данной конструкции секции №1, №3, №5 с прямым направлением тока составляют одну группу параллельно соединенных секций, а секции №2, №4 – вторую группу. При этом критическим током кабеля считается ток, при котором проникновение тока произошло во все секции полностью (т.е. является суммой критических токов для одной из

групп параллельно соединенных секций). Также стоит отметить, что во внутренних секциях течет ток в два раза больший по модулю, чем в центральной и внешней секции.

При увеличении тока от 0 до  $J_5$  (где  $J_5$  – ток срабатывания ток насыщения пятой секции (в два раза меньший тока насыщения секции №4)) насыщение секций происходит следующим образом: ток во внешнюю секцию проникает от её внутренней границы, а в секцию №4 от её внешней, как показано на рисунке 4.7.

При достижении значения тока равного  $J_5$  ток начинает проникать во внутреннюю секцию №3 (поскольку внешняя секция №5 оказалась полностью заполнена током) и насыщать её от внешней границы, насыщение секции №4 от её внешней границы прекращается, следовательно, секция №4 начинает насыщаться изнутри (то есть от зазора между секциями №3 и №4), как показано на рисунке 4.8.

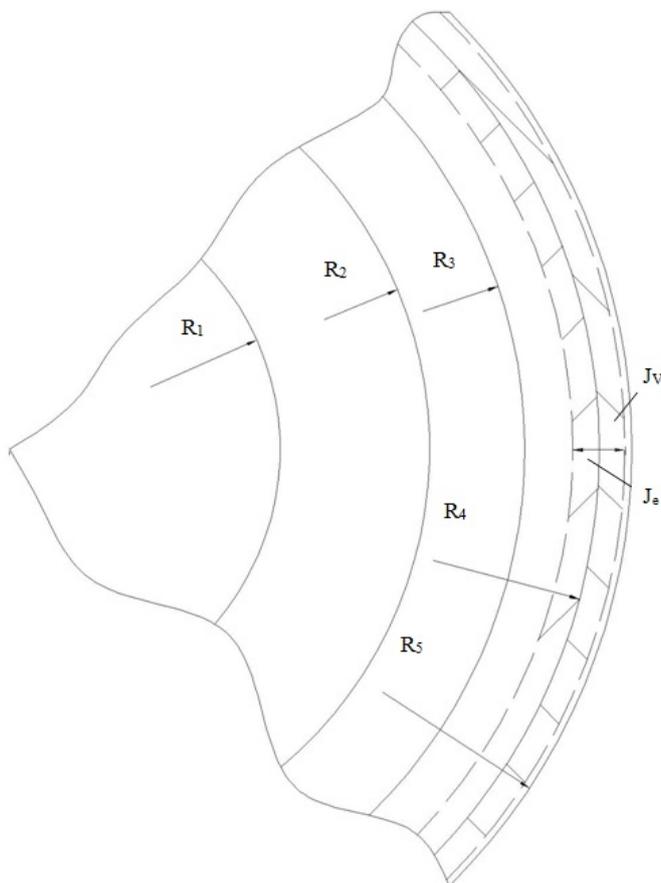


Рис. 4.7.  $J_v$  – ток, проникающий с внутренней границы секции;  $J_e$  – ток, проникающей с внешней стороны секции

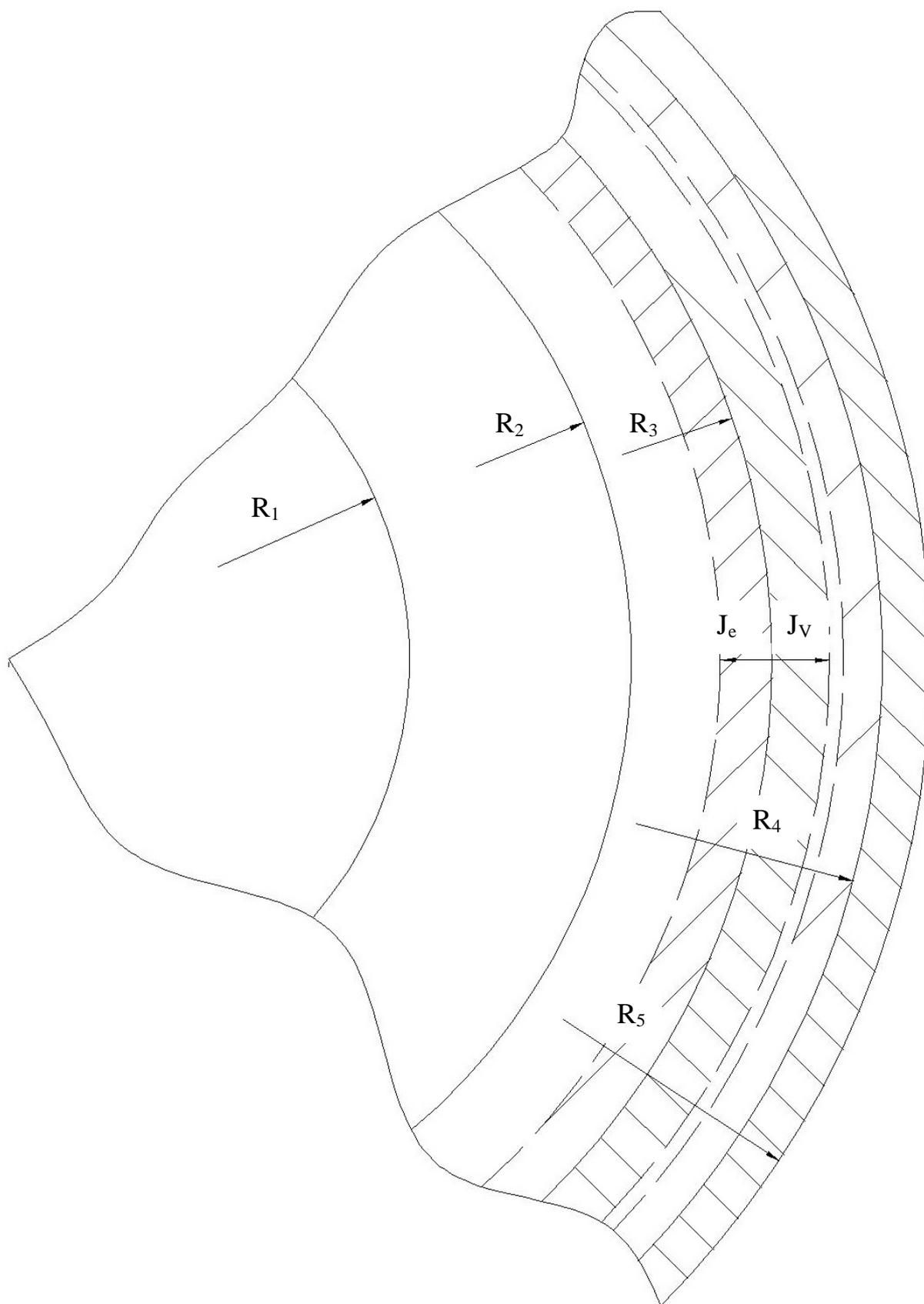


Рис. 4.8. Характер проникновения тока во внутренние секции после насыщение крайней

Как видим, в секционированном ВТСП кабеле, за счет параллельного соединения секций токи которых текут в одном направлении, насыщение секций происходит последовательно по направлению от внешних к внутренней.

#### **4.7 Результаты расчетов**

Обобщенные результаты проведенной серии оптимизационных расчетов представлены на рисунке 2.11. На рисунке даны отношения удельных потерь оптимизированных конструкций секционированного кабеля к удельным потерям эквивалентного цилиндрического кабеля, состоящего из одной секции. Для каждого варианта расчета, в качестве эквивалентного принимался цилиндрический кабель, состоящий из одной секции, рассчитанный на те же значения номинального тока  $J_{СК}$  и количества сверхпроводящего материала. То есть, принимались одинаковыми характеристики, определяемые для конкретной кабельной линии с заданной пропускной способностью по току. Естественно, что одинаковыми принимались и свойства материала – коэффициенты  $\alpha$  и  $\gamma$ . Как видим, благодаря использованию секционированного кабеля возможно достичь (в зависимости от свойств сверхпроводника и количества секций), экономии расхода сверхпроводящего материала (более чем на порядок) (см. рис. 4.5), и снижения величины гистерезисных потерь (более чем в 20 раз) (см. рис. 4.9). Эффект возрастает с увеличением количества секций. Однако соответствующие зависимости имеют тенденцию к насыщению. Поэтому, представляется целесообразным ограничивать степень секционирования пятью- семью секциями.

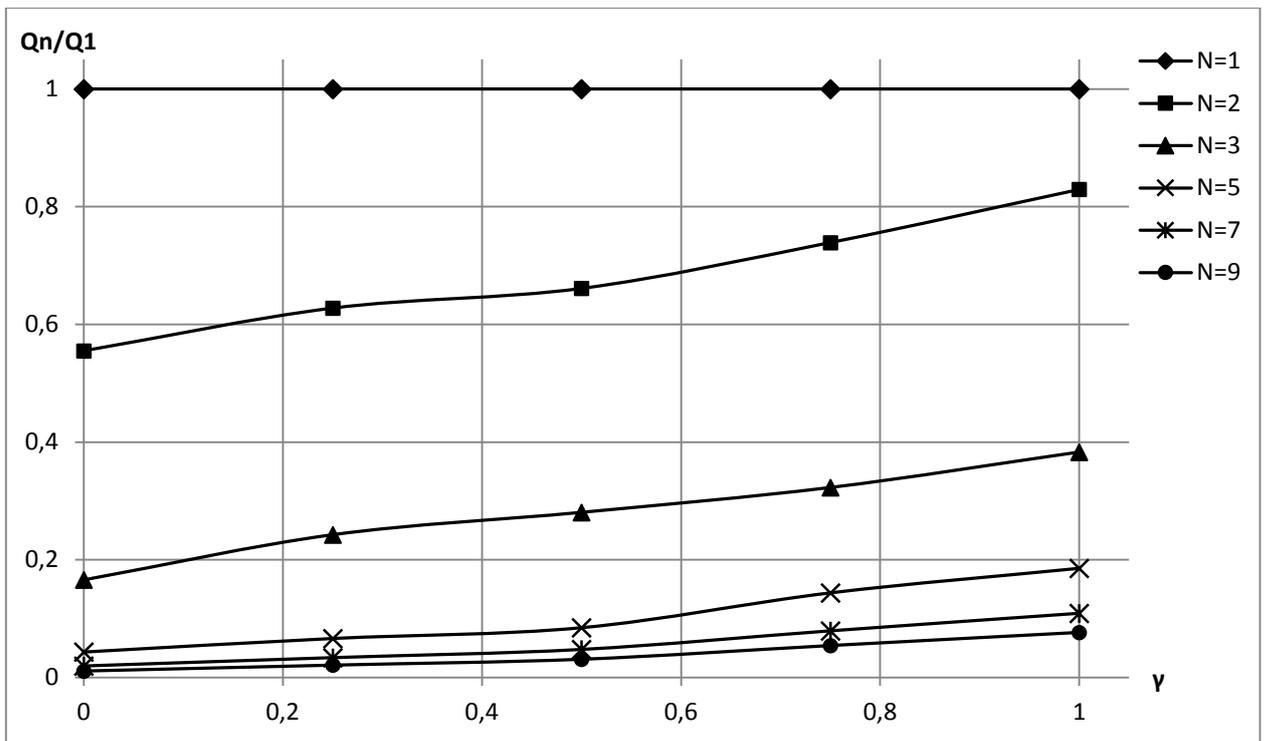


Рис. 4.9. Отношение гистерезисных потерь в оптимизированном секционированном кабеле к потерям в соответствующем эквивалентном односекционном кабеле. Режим работы сети – номинальный

#### Выводы по главе 4:

1. Разработана методика расчета секционированного сверхпроводящего кабеля для использования его во вставке постоянного тока как в одной из концепции перспективного токоограничителя;
2. Разработана методика расчёта гистерезисных потерь для кабеля постоянного тока;
3. Впервые были предложены модели секционированного кабеля постоянного тока;
4. Показано, что использование метода секционирования позволяет существенно уменьшить необходимое количество сверхпроводящего материала;

5. Предложенный способ секционирования сверхпроводящего кабеля постоянного тока позволяет значительно снизить гистерезисные потери в кабеле.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной научный результат работы – секционирование сверхпроводящих устройств ограничителей тока КЗ является универсальным приёмом для повышения эффективности использования сверхпроводящих материалов. Наиболее существенные результаты работы состоят в следующем:

6. Разработана методика расчета геометрических параметров сверхпроводящих секционированных токоограничителей, с учетом зависимости критической плотности тока от индукции магнитного поля, которая позволяет максимально эффективно использовать сверхпроводящий материал в токоограничителях и повысить плотность тока в них. Предложены варианты различных конструкций секционированных токоограничителей: резистивный, индуктивный и короткая кабельная линия постоянного тока.

7. Разработана также методика расчёта гистерезисных потерь для различных конструкций сверхпроводящих секционированных токоограничителей;

Показано, что использование секционирования обеспечивает существенную экономию сверхпроводящего материала и значительно уменьшает гистерезисные потери;

8. Показано, что одним из преимуществ резистивных токоограничителей и коротких кабельных линий постоянного тока является их компактность и экологическая чистота (отсутствие внешних магнитных полей);

9. При резистивном токоограничении в сравнении с несекционированным устройством необходимое количество сверхпроводника может быть уменьшено на порядок (при заданном уровне тока), плотность тока может быть увеличена более чем в два раза и снижение

гистерезисных потерь в нормальном режиме работы может достигать двадцать раз.

10. Исследованы сверхпроводящие токоограничители индуктивного типа. Рассмотрены индуктивные токоограничители со сверхпроводящими экранами, кольцами, а также выполненные по классической трансформаторной и автотрансформаторной схеме.

Показано, что наиболее удачной конструкцией среди токоограничителей со сверхпроводящими экранами и кольцами (короткозамкнутые кольца являются вторичной обмоткой токоограничивающего трансформатора) является конструкция секционированного трансформатора с симметрично чередующейся обмоткой при числе групп (обмотка-кольцо-обмотка) больше или равной четырём;

11. Произведено сравнение токоограничителей, рассчитанных по трансформаторной и автотрансформаторной схеме соединения обмоток (данные токоограничители могут быть произведены как полностью с использованием обычных проводников, так и полностью на сверхпроводящих материалах). Необходимо отметить, что токоограничитель автотрансформаторного типа выглядит предпочтительнее, так как вес обмоток снижается по сравнению с токоограничителем трансформаторного типа;

12. Показано, что использование сверхпроводящих обмоток в токоограничителях позволяет значительно улучшить их массогабаритные характеристики (за счет увеличения плотности тока в проводнике почти на два порядка). Масса токоограничителя трансформаторного типа спроектированного с использованием сверхпроводящих материалов более чем в 24 раза меньше массы токоограничителя такого же типа, спроектированного с использованием традиционных проводников.

Проведен анализ изменения потерь в зависимости от конструкции сверхпроводящих обмоток токоограничителей. Показано, что основной вклад

вносят гистерезисные потери. При этом использование сверхпроводника позволяет снизить электрические потери более чем в 7 раз;

13. Одним из вариантов токоограничения может являться короткая кабельная линия постоянного тока.

Показано, что использование методики секционирования сверхпроводящего кабеля позволяет существенно уменьшить необходимое количество сверхпроводящего материала (более чем на порядок) или увеличить пропускную способность кабельной линии (более чем в два раза), а также значительно снизить гистерезисные потери в кабеле (более чем в двадцать раз).

14. Впервые были предложены модели секционированного сверхпроводящего кабеля постоянного тока. Ряд предложенных моделей признан изобретением, на которые получены соответствующие патенты;

Список литературы:

- [1] Сверхпроводимость и её применение в электротехнике / под ред. Б.К. Буля и Б.М. Тареева. М.: Л., Энергия, 1964. 95 с.
- [2] Астахов Ю.Н., Веников В.А., Тер-Газарян А.Г. Накопители энергии в электрических системах. М.: Высшая школа, 1989. 159 с.
- [3] Астахов Ю.Н., Веников В.А., Зуев Э.Н., Околотин В.С. Электрические станции, сети и системы. М.: Итоги науки и техники, 1971. 159 с.
- [4] Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: - М.: Энергоатомиздат, 1986. – 640 с.
- [5] Неклепаев Б.Н. «Координация и оптимизация уровней токов короткого замыкания в электрических системах», Москва, Энергия, 1978 г.
- [6] Ю.Г.Шакарян, Н.Л.Новиков, В.С.Чуприков, А.В.Малышев, В.М.Батенин, А.С.Веселовский, А.В.Козлов, В.Е.Фортов, А.В.Шурупов, М.О.Радченко, С.В.Уколов «Short-Circuit Current Limiter for Electric Network Based on the Magnetic-Coupled Reactor and Fast-Operating Switch», 43 Сессия Международного Совета по большим электроэнергетическим системам, 23.08-27.08, CIGRE 2010, Paris, France.
- [7] Alferov D., Yevsin D., Fisher L., Ivanov V. and Sidorov V., Superconducting Fault Limiter with Fast Vacuum Commutation Modulus, Journal of Physics: Conference Series, 97 (2008), 012084.
- [8] J.H. Liamberts Superconductivity for Electric Systems, US Department of Energy Annual Peer Review – Alexandrina, August 4-6, 2009.
- [9] S.E. Yang, D.K. Park, M.C. Ahn et al, Manufacture and Test of the Bifilar Wound Coil Using Coated Conductor with Stainless Steel Stabilizer, IEEE Trans. Appl. Supercond., June 2007, v. 17, No. 2, pp. 1883-1886.

- [10] M.C. Ahn, D.K. Park, S.E. Yang et. Al, Manufacture of Superconducting Fault Current Limiter with Bypass Reactor by Employing two Different Types of HTS Wires, IEEE Trans. Appl. Supercond., June 2007, v. 17, No. 2, pp. 707-709.
- [11] J.H. Liamberts, C.S. Weber, D.W. Hazelton, Testing and Demonstration for the Transmission Level the 2G Superconducting Fault Current Limiter at SuperPower, ASC 2008.
- [12] Alferov D., Budevsky A., Dul'kin I., Fisher L., Ivanov V., Sidorov V., Shulga R., Tshay E., Yeysin D., Study of Superconducting Fault Current Limiter at SuperPower, ASC 2008.
- [13] Акинин А.А., Воронин В.А., Иванов И.А., Косолапов А.М., Любарский Д.Р., Марусов Н. Л. «Ограничение токов короткого замыкания в сетях 110-220 кВ на базе вакуумных управляемых разрядников», Энергия единой сети, декабрь 2013-январь 2014 г, стр.64-69.
- [14] С.С. Иванов, В.Д. Жемерикин, С.И. Копылов, Однофазный сверхпроводящий управляемый реактор, Препринт ОИВТ РАН № 4-475 – М., 2004, 28 с.
- [15] И.З. Глушкин, Г.А. Дмитриева, М.Ш. Мисриханов, В.Г. Наровлянский, И.В. Якимец. – М.: Энергоатомиздат, 2002, 373 с.
- [16] Y. Xin, W.Z. Gong, Y.W. Sun, J.B. Cui, H. Hong, X.Y. Niu, H.Z. Wang, L.Z. Wang, Q. Li, J.Y. Zhang, Z.Q. Wei, L. Liu, H. Yang and X.H. Zhu «Factory and Field Tests of a 220 kV/300 MVA Statured Iron-core Superconducting Fault Current Limiter.», report at applied superconductivity conference 2012, Portland (OR), USA, 5602305.
- [17] Альтов В.А., Копылов, С.И., Иванов С.С., Желтов В.В., Попова М.В. «Токоограничивающие устройства трансформаторного типа», Элеткро №5, 2010 г., стр. 46-55.
- [18] Кривецкий И.В. «Токоограничитель трансформаторного и автотрансформаторного типа (127 кВ, 2 кА)», сборник научных статей по

материалам III Международной научно-практической конференции «Применение инновационных технологий в научных исследованиях», Курск, 2011 г., стр.81-84.

[19] Jipping J. et al., Impact of HTS Cables on Power Flow Distribution. IEEE, 2001.

[20] Высоцкий В.С., Носов А.А., Рычагов А.В., Сытников В.Е., Фетисов С.С., Шутов К.А. «Создание силового сверхпроводящего кабеля на базе ВТСП технологий» / «Кабели и провода», №2 (321), 2010, с.3-10.

[21] Сытников В.Е., Бемерт С.Е., Бердников Р.Н., Фролов О.В., Шакарян Ю.Г., Шершневу Ю.А. «Российский проект: сверхпроводящая кабельная линия постоянного тока для электрических сетей современного мегаполиса», Энергия единой сети, №4, октябрь-ноябрь, 2012.

[22] Д. Монтгомери «Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов», изд-во «МИР», Москва 1971 г., 359 с.

[23] В.Б. Зенкевич, В.В. Сычев «Магнитные системы на сверхпроводниках», изд-во «НАУКА», Москва 1972 г., 259 с.

[24] Уилсон М. «Сверхпроводящие магниты»: - М.: Мир, 1985. – 405 с.

[25] V.E. Sytnikov, S.E. Bemert, Yu.V. Ivanov, S.I. Kopylov, I.V. Krivvetskiy, D.S. Rimorov, M.S. Romashov, Yu.G. Shakaryan, R.N. Berdnikov, Yu.A. Goryushin and D.G. Timofeev “HTS DC Cable Line Project: On-Going Activities in Russia”, IEEE, Applied Superconductivity, vol.23, №3, June 2013, 5401904.

[26] Y. Wang, F. Zhang, Z. Gao, Z. Zhu, S. Dai, L. Lin, L. Xiao “Development of a high-temperature superconducting bus conductor with large current capacity”, Superconductor Science and Technology. 22 (2009) 055018 (5pp).

[27] Irie F., Yamafuji K. “Theory of Flux Motion in Non-Ideal Type-II Superconductors”, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 23, No. 2, pp. 255-268, August, 1976.

- [28] Андрианов В.В., Копылов С.И. «Определение параметров сверхпроводниковых катушек с параллельным соединением секций», - Электричество, 1983 г., №12, с. 43-46.
- [29] <http://ria.ru/science/20130729/952733606.html>
- [30] W. Paul, L. Lakner et. al. "Test of the 2MVA high- $T_c$  superconductivity fault current limiter" Supercond. Sc. Technol., v.10, №12, 1997, p. 914-918.
- [31] Копылов С.И., Кондаурова Н.В. «Токоограничивающий реактор автотрансформаторного типа», Материалы II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики АПК», Саратовский ГАУ, 2011, С. 156-159.
- [32] Буткевич Г.В. «Дуговые процессы при коммутациях в электрических системах», -М.: Энергия. -1973 г., - 264 с.
- [33] Ивакин В.Н., Ковалёв В.Д. «Применение токоограничивающих устройств в высоковольтных электрических сетях», ЭЛЕКТРО, 2/2009, с. 7-13.
- [34] Алфёров Д.В., Ахметгареев М.Р., Будовский А.Н., Бунин Р.А., Волошин И.Ф., Дегтяренко П.Н., Евсин Д.В., Иванов В.П., Сидоров В.А., Фишер Л.М., Цхай Е.В. «Сверхпроводящий выключатель постоянного тока», Известия РАН, Энергетика, 2011, №4, с. 30-36.
- [35] Копылов С.И., Кривецкий И.В., Желтов В.В., Сытников В.Е. «Оптимизация характеристик высокотемпературных сверхпроводящих кабелей путём их секционирования», Электричество, 2012, №12, с. 60-63.
- [36] S.I. Kopylov, N.N. Balashov, V.V. Zheltov, I.V. Krivetsky, V.E. Sytnikov «Sectioning of a High-Current Superconducting Cable», IEEE, Applied Superconductivity, vol.23, №3, June 2013, 5401904.
- [37] Брехна Г. «Сверхпроводящие магнитные системы», изд-во «МИР», Москва 1976 г., 704 с.

- [38] «Электрические машины и устройства на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников» / Под ред. Л.К. Ковалёва, К.Л. Ковалёва, С.М.-А. Конеева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 396 с.
- [39] Копылов С.И., Иванов С.С., Жемерикин В.Д., «Секционирование сверхпроводящих токоограничивающих устройств», Электротехника, -2005, №6, -С. 44-48.
- [40] Пат. 39002 РФ. Однофазный сверхпроводящий токоограничивающий реактор / Веселовский А.С., Иванов С.С., Жемерикин В.Д. и др. 10.07.04
- [41] Вакуумный выключатель. Патент RUNº82930, МПК H01H 33/66, H01H33/42, опубл. 10.05.2009г.
- [42] <http://www.abb.com/mediumvoltage>
- [43] Y.G. Shakarian, N.L. Novikov, V.S. Chuprikov, A.V. Malyshev, V.M. Batenin, A.S. Veselovsky, A.V. Kozlov, S.I. Kopylov, V.E. Fortov, A.V. Shurupov, M.O. Raychenko, S.V. Ukolov «Short-Circuit Current Limiter for Electric Network Based on the Magnetic-Coupled Reactor and Fast-Operating Switch», CIGRE 2010, A3\_305\_2010.
- [44] В.А. Альтов, С.С. Иванов, В.В. Желтов, С.И. Копылов, М.В. Попова «Токоограничивающее устройство трансформаторного типа», Электро, №5, 2010, 46-55.
- [45] <http://www.superpower-inc.com/>
- [46] Желтов В.В. «Программа расчета проникновения поля в линейные и кольцевые сверхпроводники». Электричество, N7, 2009, стр.61-67
- [47] <http://www.bruker-est.com>
- [48] Двухжильный сверхпроводящий кабель. Патент RUNº123210, МПК H01B 11/18, опубликован 20.12.2012.
- [49] Трехжильный сверхпроводящий кабель. Патент RUNº123211, МПК H01B 11/18, опубликован 20.12.2012.

- [50] Сверхпроводящий кабель. Патент RUN№123212, МПК H01B 11/18, опубликован 20.12.2012.
- [51] Многожильный сверхпроводящий кабель. Патент RUN№123213, опубликован 20.12.2012.
- [52] Глебов И.А., Лаверик Ч., Шахтарин В.Н. «Электрические проблемы использования сверхпроводимости» -Л.: Наука, 1980.-256 с.
- [53] Стабилизация сверхпроводящих магнитных систем / В.А. Альтов, В.Б. Зенкевич, М.Г. Кремлев, В.В. Сычев; - М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 464 с.
- [54] Управляемые подмагничиванием электрически реакторы. Сб. статей. Под ред. доктора техн. наук проф. А.М. Брянцева. – М.: «Знак». 2004. 264 с.
- [55] Е.И. Забудский. Совмещенные регулируемые электромагнитные реакторы. – М.: Энергоатомиздат. 2003. – 436 с.
- [56] Копылов С.И. «Влияние регулируемого сверхпроводником токоограничивающего индуктивного сопротивления на устойчивость энергосистемы», Электричество, 2007, № 6, С.14-21.
- [57] С.И. Копылов, В.В. Желтов, И.В. Кривецкий, В.Е. «Влияние секционирования на характеристики сверхпроводящего резистивного токоограничителя», Электротехника, №12, 2013 г., с. 25-28.
- [58] Сытников В.Е., Шакарян Ю.Г., Копылов С.И., Кривецкий И.В. «ВТСП передача постоянного тока как элемент «интеллектуальной сети» крупных городов», Материалы 1-й национальной конференции по прикладной сверхпроводимости НКПС – 2011, 6-8 декабря 2011г., НИЦ «Курчатовский институт» С. 294-298.
- [59] Сытников В.Е., Шакарян Ю.Г., Копылов С.И., Риморов Д.С., Кривецкий И.В., Фролов О.В., Шершнёв Ю.А. «ВТСП передача постоянного тока как элемент «интеллектуальной сети» крупных городов», Сборник тезисов 1-ой

Национальной конференции по прикладной сверхпроводимости, Москва, 6-8 декабря, 2011, С. 93.

[60] Попова М.В., Кривецкий И.В. Жариков О.Е., Маркарова Е.Н. «К вопросу создания токоограничителей для электрических сетей»/ Инженерные решения по энергетике, водоочистке и механизации процессов сельскохозяйственного производства: Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых 12 апреля 2013 года: Вып. 1 / Рос. гос. аграр. заоч. ун-т. – М., 2013. – с.94-95.

[61] Накопители энергии: / Д.А. Бут, Б.Л. Алиевский, С.Р. Мизюрин, П.В. Васюкевич; Под ред. Д.А. Бута. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.

[62] Электромеханические преобразователи на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников / Л.К. Ковалёв, К.Л. Ковалёв, С.М.-А. Конеев, В.Т. Пенкин, В.Н. Полтавец. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008. - 440 с.

[63] Ш.И. Лутидзе, Э.А. Джафаров «Сверхпроводящие трансформаторы», М.: ООО Изд-во «Научтехлитиздат», 2002.-206 с.

[64] P. Arsenio, T. Silva, N. Vilhena, J.M. Pina, A. Pronto «Analysis of Characteristic Hysteresis Loops of Magnetic Shielding Inductive Fault Current Limiters», IEEE, Applied Superconductivity, vol.23, №3, June 2013, 5601004.

[65] Rogers E.C., Cave E.C., Grigsby R. «Conf. Low Temperat. and Electr. Power, London. 1969», London, s.a., pp. 209-216 (РЖЭ, 1969, 12E296).

[66] Anpoix M., Moisson F., Carbonel E. «Conf. Low Temperat. and Electr. Power, London. 1969», London, s.a., pp. 254-259.

[67] H.-M. Chang and S.I. Lee «Optimization of Current Leads for HTS Elements Immersed in Liquid Nitrogen», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 4800904.

[68] R. Wesche, M. Borsch, P. Bruzzone, F. Holdener, E. Iten, N. Maginetti, S. March, D. Oertig, H. Quack, and M. Vogel «Development of HTS Current Leads

for Industrial Fabrication», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 4801004.

[69] F. Gomory, F. Inanir «AC Losses in Coil Wound From Round Wire Coated by a Superconducting Layer», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 4704704.

[70] S. Fukui, M. Shibayama, J. Ogawa, T. Oka, T. Sato, T. Takao, O. Tsukamoto «Measurement and Numerical Analysis of AC Loss in High Temperature Superconducting Coil», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 4704904.

[71] M. Noe, A. Hobl, P. Tixador, L. Martini, and B. Dutoit «Conceptual Design of a 24 kV, 1 kA Resistive Superconducting Fault Current Limiter», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 5600304.

[72] Z. Hong, J. Sheng, J. Zang, D. Lin, L. Ying, Y. Li, and Z. Jin «The Development and Performance Test of a 10 kV Resistive Type Superconducting Fault Current Limiter», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 5600504.

[73] Y. Nikulshin, A. Friedman, Y. Wolfus, V. Rozenstein, and Y. Yeshurun «Dynamic Desaturation Process in Saturated Cores Fault Current Limiters», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 5601704.

[74] J. Kozak, M. Majka, S. Kozak, and T. Janowski «Design and Test of Coreless Inductive Superconducting Fault Current Limiter», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 5601804.

[75] J.B. Na, H. Kang, and T.K. Ko «Numerical Analysis and Electrical Insulation Design of a Single-Phase 154 kV Class Non-Inductively Wound Solenoid Type Superconducting Fault Current Limiter», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 5602104.

[76] L. Ying, J. Sheng, B. Lin, L. Yao, J. Zang, Z. Jin, Y. Li, and Z. Hong «AC Loss and Contact Resistance of Resistive Type Fault Current Limiter Using YBCO

Coated Conductors», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 5602204.

[77] J.B. Na, Y.J. Kim, J. Y. Jang, K.S. Ryu, Y.J. Hwang, S. Choi, and T.K. Ko «Design and Test of Prototype Hybrid Superconducting Fault Current Limiter With Fast Switch», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 5602604.

[78] H. Piekarz, S. Hays, J. Blowers, and V. Shiltsev «A Measurement of HTS Cable Power Loss in a sweeping Magnetic Field», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 5800105.

[79] L. Xiao, S. Dai, L. Lin, Y. Teng, H. Zhang, X. Liang, Z. Gao, D. Zhang, N. Song, Z. Zhu, F. Zhang, X. Li, Z. Cao, X. Xu, W. Zhou, and F. Jiao «Development of a 10 kA HTS DC Power Cable», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 5800404.

[80] S.-H. Sohn, H.-S. Yang, J.-H. Lim, S.-R. Oh, S.-W. Yim, S.-K. Lee, H.-M. Jang, and S.-D. Hwang «Installation and Power Grid Demonstration of a 22,9 kV, 50 MVA, High Temperature Superconducting Cable for KEPCO», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 5800804.

[81] X. Wang, A. Ishiyama, M. Yagi, O. Maruyama, and T. Ohkuma «Overcurrent Tests and Numerical Simulations of a 66-kV-class RE123 High Temperature Superconducting Model Cable», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 5800904.

[82] J.-H. Kim and S. Pamidi «Electrical Characteristics of 2G HTS Tapes Under DC Current With AC Ripple», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 5801104.

[83] S.-K. Kim, S. Kim, J.-G. Kim, M. Park, I.-K. Yu, Y.H. Choi, and H. Lee «Harmonic Current Based Loss Characteristics Analysis of HTS DC Model Cable Using Calorimetric Method», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 5801204.

- [84] J.-G. Kim, S.-K. Kim, M. Park, I.-K. Yu, H. Lee, Y.-G. Kim, H.-M. Kim, Y.-J. Won, K.-W. Jeong, and B. Yang «Loss Characteristics Analysis of HTS DC Power Cable Using LCC Based DC Transmission Systems», IEEE, Applied Superconductivity, vol.22, №3, June 2012, 5801304.
- [85] J.-H. Kim, C.H. Kim, V. Pothavajhala, and S.V. Pamidi «Current Sharing and Redistribution in Superconducting DC Cable», IEEE, Applied Superconductivity, vol.23, №3, June 2013, 4801304.
- [86] M. Hamabe, H. Watanabe, J. Sun, N. Yamamoto, T. Kawahara, and S. Yamaguchi «Status of a 200-Meter DC Superconducting Power Transmission Cable After Cooling Cycles», IEEE, Applied Superconductivity, vol.23, №3, June 2013, 5400204.
- [87] J. Sun, H. Watanabe, T. Kawahara, and S. Yamaguchi «Effects of HTS Tape Arrangements to Increase Critical Current for the DC Power Cable», IEEE, Applied Superconductivity, vol.23, №3, June 2013, 5401104.
- [88] G. Del-Rosario-Calaf, J. Lloberas-Valls, A. Sumper, X. Granados, and R. Villafafila-Robles «Modeling of Second Generation HTS Cables for Grid Fault Analysis Applied to Rower System Simulation», IEEE, Applied Superconductivity, vol.23, №3, June 2013, 5401204.
- [89] L. Xiao, S. Dai, L. Lin, Z. Zhang, and J. Zhang «HTS Power Technology for Future DC Power Grid», IEEE, Applied Superconductivity, vol.23, №3, June 2013, 5401506.
- [90] O. Maruyama, T. Ohkuma, T. Masuda, Y. Ashibe, S. Mukoyama, M. Yagi, T. Saitoh, T. Hasegawa, N. Amemiya, A. Ishiyama, and N. Hayakawa «Development of 66 kV and 275 kV Class REBCO HTS Power Cables», IEEE, Applied Superconductivity, vol.23, №3, June 2013, 5401405.
- [91] K. Sim, S. Kim, J.W. Cho, H. Jang, and S. Hwang «Design and Current Transporting Characteristics of 80 kV Direct Current High Temperature Superconducting Cable Core», IEEE, Applied Superconductivity, vol.23, №3, June 2013, 5401804.

- [92] J. Kozak, M. Majka, S. Kozak, and T. Janowski «Comparison of Inductive and Resistive SFCL», IEEE, Applied Superconductivity, vol.23, №3, June 2013, 5401804.
- [93] Z. Hong, J. Sheng, L. Yao, J. Gu, and Z. Jin «The Structure, Performance and Recovery Time of a 10 kV Resistive Type Superconducting Fault Current Limiter», IEEE, Applied Superconductivity, vol.23, №3, June 2013, 5601304.
- [94] J. Zhang, S. Dai, Z. Zhang, D. Zhang, L. Zhao, F. Shi, M. Wu, X. Xu, Z. Wang, F. Zhang, N. Song, Z. Gao, G. Zhang, T. Ma et al «Development of a Combined YBCO/Bi2223 Coils for Model Fault Current Limiter», IEEE, Applied Superconductivity, vol.23, №3, June 2013, 5601705.
- [95] A. Hobl, W. Goldacker, B. Dutoit, L. Martini, A. Petermann, and P. Tixador «Design and Production of the ECCOFLOW Resistive Fault Current Limiter», IEEE, Applied Superconductivity, vol.23, №3, June 2013, 5601804.
- [96] C.A. Baldan, J.S. Lamas, A.A Bernardes, C.Y. Shigue, and E. Ruppert «Fault Current Limiter Using Transformer and Modular Device of YBCO Coated Conductor» IEEE, Applied Superconductivity, vol.23, №3, June 2013, 5603804.
- [97] L. Ying, J. Xu, J. Sheng, B. Lin, Z. Jin, Z. Hong, and Z. Li «Numerical and Experimental Analysis of AC Loss of YBCO Coated Conductor Carrying DC and AC Offset Transport Current», IEEE, Applied Superconductivity, vol.23, №3, June 2013, 5900704.
- [98] Полущенко О.Л., Матвеев В.А., Нижельский Н.А., Шавкин С.В. Рост кристаллов и структуры иттрий-бариевых сверхпроводников при направленной кристаллизации //Физика и химия обработки материалов, 2003, №1, с. 77-82.
- [99] [http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bulletein/bulletein\\_v8\\_n2\\_2011.pdf](http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bulletein/bulletein_v8_n2_2011.pdf)

## ПРИЛОЖЕНИЯ

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 123210

### ДВУХЖИЛЬНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ КАБЕЛЬ

Патентообладатель(и): *Открытое акционерное общество "Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы" (RU), Открытое акционерное общество "Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012127110

Приоритет полезной модели 28 июня 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20 декабря 2012 г.

Срок действия патента истекает 28 июня 2022 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) RU<sup>(11)</sup> 123 210<sup>(13)</sup> U1  
(51) МПК  
H01B 11/18 (2006.01)

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012127110/07, 28.06.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
28.06.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 28.06.2012

(45) Опубликовано: 20.12.2012 Бюл. № 35

Адрес для переписки:  
119334, Москва, ул. Косыгина, 5, кв.35, М.Б.  
Щедрина

(72) Автор(ы):

Желтов Владимир Валентинович (RU),  
Копылов Сергей Игоревич (RU),  
Кривецкий Игорь Владимирович (RU),  
Сытников Виктор Евгеньевич (RU),  
Шакарян Юрий Гевондович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Открытое акционерное общество  
"Федеральная сетевая компания Единой  
энергетической системы" (RU).  
Открытое акционерное общество "Научно-  
технический центр Федеральной сетевой  
компании Единой энергетической системы"  
(RU)

(54) ДВУХЖИЛЬНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ КАБЕЛЬ

(57) Формула полезной модели

1. Двухжильный сверхпроводящий кабель, содержащий выполненные из однотипного высокотемпературного сверхпроводящего материала и коаксиально расположенные наружную и центральную жилы с кольцевыми сечениями, внешние радиусы которых удовлетворяют соотношению

$$R_{\text{н}}/R_{\text{в}}=1,4-0,15\gamma,$$

при этом жилы кабеля предназначены для протекания встречных токов, а  $\gamma$  задается в пределах от 0 до 1 электромагнитными свойствами материала жил.

2. Кабель по п.1, отличающийся тем, что значение  $\gamma$  уточнено путем аппроксимации характеристики  $j_c(B)$  материала жил зависимостью

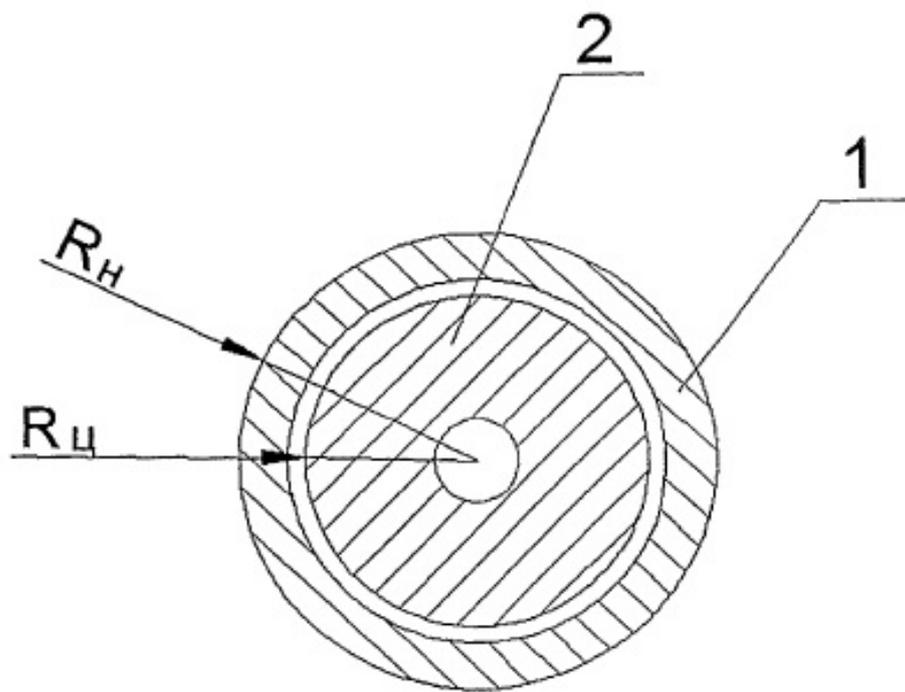
$$j_c = \frac{\alpha}{B^\gamma},$$

где  $j_c$  - средняя плотность критического тока в материале жил;  $B$  - индукция магнитного поля;  $\alpha$  - критерий лоренцевой силы высокотемпературного сверхпроводника, на основе которого выполнен материал жил.

RU 1 2 3 2 1 0 U 1

RU 1 2 3 2 1 0 U 1

RU 1 2 3 2 1 0 U 1



RU 1 2 3 2 1 0 U 1

Сip.: 2

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 123211

### ТРЕХЖИЛЬНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ КАБЕЛЬ

Патентообладатель(ли): *Открытое акционерное общество "Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы" (RU), Открытое акционерное общество "Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012127109

Приоритет полезной модели 28 июня 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20 декабря 2012 г.

Срок действия патента истекает 28 июня 2022 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Б.П. Симонов*





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

**(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2012127109/07, 28.06.2012

(24) Дата начала отчета срока действия патента:  
28.06.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 28.06.2012

(45) Опубликовано: 20.12.2012 Бюл. № 35

Адрес для переписки:

119334, Москва, ул. Косыгина, 5, кв.35, М.Б.  
Щедрина

(72) Автор(ы):

Желтов Владимир Валентинович (RU),  
Копылов Сергей Игоревич (RU),  
Кривецкий Игорь Владимирович (RU),  
Сытников Виктор Евгеньевич (RU),  
Шакарин Юрий Гевондович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Открытое акционерное общество  
"Федеральная сетевая компания Единой  
энергетической системы" (RU).  
Открытое акционерное общество "Научно-  
технический центр Федеральной сетевой  
компании Единой энергетической системы"  
(RU)

(54) ТРЕХЖИЛЬНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ КАБЕЛЬ

(57) Формула полезной модели

1. Трехжильный сверхпроводящий кабель, предназначенный для протекания встречных токов в соседних жилах и содержащий выполненные из однотипного материала на основе высокотемпературного сверхпроводника и коаксиально расположенные наружную, центральную и внутреннюю жилы с кольцевыми сечениями, внешние радиусы которых удовлетворяют соотношениям:

$$R_{\text{нар}}/R_{\text{центр}}=2,0-0,4\gamma;$$

$$R_{\text{внутр}}/R_{\text{центр}}=1,7-0,3\gamma,$$

где  $\gamma$  задается в пределах от 0 до 1 электромагнитными свойствами материала жил.

2. Кабель по п.1, отличающийся тем, что значение  $\gamma$  уточнено путем аппроксимации характеристики  $j_c(B)$  материала жил зависимостью

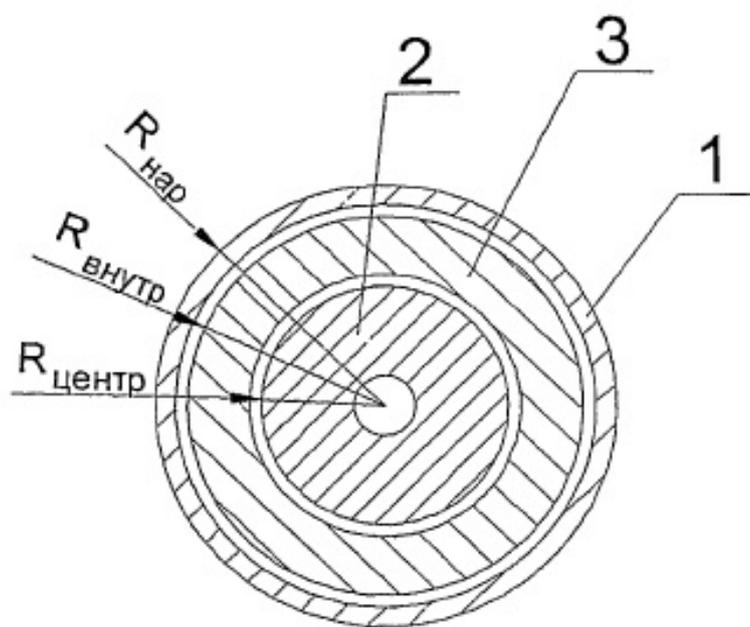
$$j_c = \frac{\alpha}{B^\gamma}$$

где  $j_c$  - средняя плотность критического тока в материале жил;  $B$  - индукция магнитного поля;  $\alpha$  - критерий лоренцевой силы высокотемпературного сверхпроводника, на основе которого выполнен материал жил.

RU 1 2 3 2 1 1 U 1

RU 1 2 3 2 1 1 U 1

RU 1 2 3 2 1 1 U 1



RU 1 2 3 2 1 1 U 1

Стр. 2

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 123212

### СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ КАБЕЛЬ

Патентообладатель(ли): *Открытое акционерное общество "Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы" (RU), Открытое акционерное общество "Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012127111

Приоритет полезной модели 28 июня 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20 декабря 2012 г.

Срок действия патента истекает 28 июня 2022 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Б.П. Симонов*





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012127111/07, 28.06.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
28.06.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 28.06.2012

(45) Опубликовано: 20.12.2012 Бюл. № 35

Адрес для переписки:

119334, Москва, ул. Косыгина, 5, кв.35, М.Б.  
Щедрина

(72) Авторы:

Желтов Владимир Валентинович (RU),  
Копылов Сергей Игоревич (RU),  
Кривецкий Игорь Владимирович (RU),  
Сытник Виктор Евгеньевич (RU),  
Шакарян Юрий Гезовидович (RU)

(73) Патентообладатели:

Открытое акционерное общество  
"Федеральная сетевая компания Единой  
энергетической системы" (RU),  
Открытое акционерное общество "Научно-  
технический центр Федеральной сетевой  
компания Единой энергетической системы"  
(RU)

(54) СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ КАБЕЛЬ

(57) Формула полезной модели

1. Сверхпроводящий кабель, содержащий выполненные из однотипного сверхпроводящего материала и коаксиально расположенные наружную, центральную, первую, ближнюю к центральной, и вторую внутренние жилы с кольцевыми сечениями, внешние радиусы  $R_n$ ,  $R_c$ ,  $R_{s1}$  и  $R_{s2}$  удовлетворяют соотношениям:

$$R_n/R_c=2,3-0,6\gamma;$$

$$R_{s2}/R_c=2,2-0,55\gamma;$$

$$R_{s1}/R_c=1,7-0,3\gamma,$$

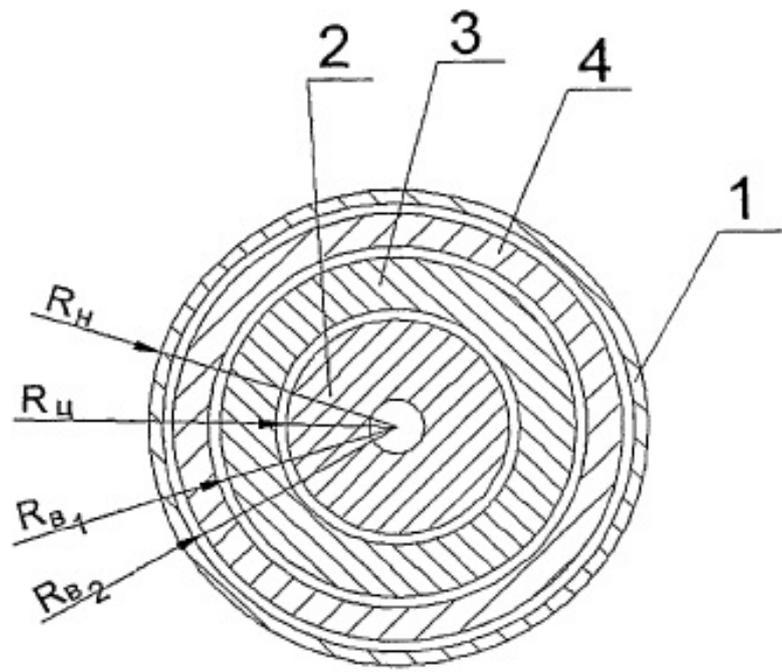
при этом соседние жилы кабеля предназначены для протекания встречных токов, величины которых в каждой внутренней жиле вдвое больше, чем в центральной жиле и наружной жиле, а  $\gamma$  задается в пределах от 0 до 1 электромагнитными свойствами материала жил.

2. Кабель по п. 1, отличающийся тем, что значение  $\gamma$  уточнено путем аппроксимации характеристики  $j_c(B)$  материала жил зависимостью

$$j_c = \frac{\alpha}{B^\gamma}$$

где  $j_c$  - средняя плотность критического тока в материале жил;  $B$  - индукция магнитного поля;  $\alpha$  - критерий лоренцевой силы высокотемпературного сверхпроводника, на основе которого выполнен материал жил.

RU 1 2 3 2 1 2 U 1



RU 1 2 3 2 1 2 U 1

Срп: 2

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 123213

### МНОГОЖИЛЬНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ КАБЕЛЬ

Патентообладатель(ли): *Открытое акционерное общество "Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы" (RU), Открытое акционерное общество "Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012128094

Приоритет полезной модели 05 июля 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20 декабря 2012 г.

Срок действия патента истекает 05 июля 2022 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) 123213 U1  
(51) МПК  
H01B 12/10 (2006.01)

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012128094/07, 05.07.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
05.07.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 05.07.2012

(45) Опубликовано: 20.12.2012 Бюл. № 35

Адрес для переписки:

119334, Москва, ул. Косыгина, 5, кв.35, М.Б.  
Щедрину

(72) Авторы:

Желтов Владимир Валентинович (RU),  
Копылов Сергей Игоревич (RU),  
Кривецкий Игорь Владимирович (RU),  
Сытников Виктор Евгеньевич (RU),  
Шакарян Юрий Гевондович (RU)

(73) Патентообладатели:

Открытое акционерное общество  
"Федеральная сетевая компания Единой  
энергетической системы" (RU),  
Открытое акционерное общество "Научно-  
технический центр Федеральной сетевой  
компании Единой энергетической системы"  
(RU)

(54) МНОГОЖИЛЬНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ КАБЕЛЬ

(57) Формула полезной модели

1. Сверхпроводящий кабель, содержащий выполненные из однотипного сверхпроводящего материала и коаксиально расположенные наружную, центральную, первую, вторую и третью внутренние жилы с кольцевыми сечениями, внешние радиусы  $R_n$ ,  $R_c$ ,  $R_{n1}$ ,  $R_{n2}$  и  $R_{n3}$  которых удовлетворяют соотношениям:

$$R_n/R_c=2,8-0,8\gamma;$$

$$R_{n3}/R_c=2,65-0,75\gamma;$$

$$R_{n2}/R_c=2,2-0,55\gamma;$$

$$R_{n1}/R_c=1,7-0,3\gamma,$$

при этом соседние жилы кабеля предназначены для протекания встречных токов, а  $\gamma$  задается в пределах от 0 до 1 электромагнитными свойствами материала жил.

2. Кабель по п.1, отличающийся тем, что значение  $\gamma$  уточнено путем аппроксимации характеристики  $j_c(B)$  материала жил зависимостью

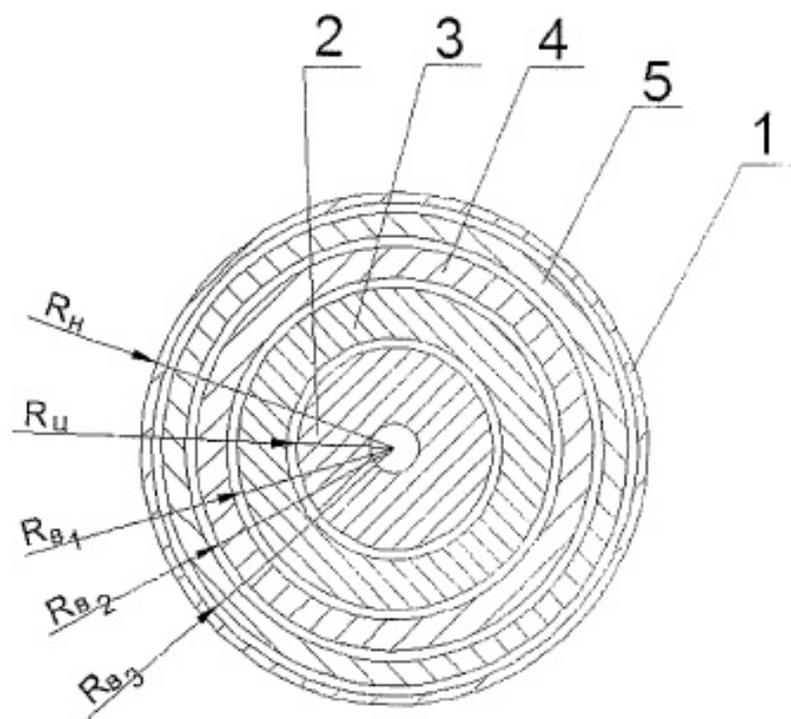
$$j_c = \frac{\alpha}{B^\gamma},$$

где  $j_c$  - средняя плотность критического тока в материале жил;  $B$  - индукция магнитного поля;  $\alpha$  - критерий лоренцевой силы высокотемпературного сверхпроводника, на основе которого выполнен материал жил.

RU 1 2 3 2 1 3 U 1

RU 1 2 3 2 1 3 U 1

RU 1 2 3 2 1 3 U 1



RU 1 2 3 2 1 3 U 1

Срл: 2

«Утверждаю»

Зам. директора ОИВТ РАН

по науке

чл. корр. РАН



В.М. Батенин

### АКТ

внедрения результатов диссертационной работы  
Кривецкого И.В. «Разработка рациональных способов секционирования  
сверхпроводящих токоограничивающих устройств»

Настоящий акт составлен о том, что ряд результатов диссертационной работы И.В. Кривецкого «Разработка рациональных способов секционирования сверхпроводящих токоограничивающих устройств», полученных при решающем творческом участии И.В. Кривецкого в 2011-2014 гг. в рамках гранта РФФИ 11-08-00313 «Расчет тепловых потерь и других электротехнических характеристик в ВТСП лентах и в сверхпроводящих кабелях на их основе» (научный руководитель Желтов В.В.) и гранта РФФИ 12-08-00412-а «Математическое моделирование тепловых и электрофизических процессов ВТСП кабелей сложной конструкции» (научный руководитель Копылов С.И.), выполняющихся в ОИВТ РАН, использовались в практической деятельности ОИВТ РАН с высоким научным и техническим эффектом.

В частности, в ОИВТ РАН внедрены методики и результаты расчетов характеристик сверхпроводящих токоограничивающих устройств.

Поскольку результаты работы И.В. Кривецкого использовались при создании принципиально новой перспективной аппаратуры, рассчитать экономический эффект в настоящее время не представляется возможным.

Зав. лаб. 2.4.1

к.т.н.



С.С. Иванов

Зам. зав. отделом

к.т.н.



А.В. Ванюшин