

На правах рукописи



Кривецкий Игорь Владимирович

**РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ СПОСОБОВ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ТОКОГРАНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ.**

Специальность 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник, **Копылов Сергей Игоревич**

Официальные оппоненты: **Альтов Валерий Александрович**, д.т.н., профессор, Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, главный научный сотрудник

Дежин Дмитрий Сергеевич, к.т.н., доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», доцент кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы»

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «**Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна.**

Защита состоится «24» июня 2014 г. в часов на заседании диссертационного совета Д212.125.07. при Федеральном Государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального Государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Автореферат разослан « » 2014 года

Ученый секретарь диссертационного совета Д212.125.07,
кандидат технических наук



Степанов В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие электроэнергетических систем характеризуется устойчивым ростом электрических нагрузок, увеличением генерирующих мощностей, усилением связей с соседними энергетическими 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 т.д. Сверхнормативные токи КЗ могут повреждать выключатели, обеспечивающие локализацию и ликвидацию аварийных ситуаций в системе, что приводит к увеличению масштабов последствий КЗ.

Максимальный уровень токов КЗ, определяющий требования к электрическим аппаратам и оборудованию, становится критическим параметром и ограничивающим фактором развития электрических систем.

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.

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.

В настоящее время стоимость любого сверхпроводящего устройства на 50-80% состоит из стоимости сверхпроводящего материала, используемого в нём, поэтому встаёт вопрос о максимально эффективном его использовании. Для этого в работе разрабатывается методика секционирования различных конструкций сверхпроводящих токоограничивающих устройств.

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 габаритные размеры токоограничителя, либо на увеличение плотности тока в сверхпроводнике. Также важным параметром для токоограничителя являются потери в сверхпроводнике при нормальном режиме работы энергосистемы.

Предметом исследования является методика расчета характеристик токоограничивающих устройств (ТУ) позволяющая максимально эффективно использовать сверхпроводящих материал.

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 токонесущие 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 выявлено снижение гистерезисных 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 создавать высокоэффективные образцы токоограничителей, кроме того разработанные методики секционирования могут использоваться в кабелях постоянного тока при биполярной передаче и размещении прямого и обратного проводника в одном кабеле. 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, а также 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 работ, из них две в журналах, входящих в перечень ВАК, две в зарубежных цитируемых изданиях, а так же 4 патента на полезную модель.

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

На защиту выносятся: 1. 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;

2. Уменьшение гистерезисных потерь (в номинальном режиме работы токоограничителя) в секционированных устройствах относительно несекционированных, рассчитанных на те же параметры;

3. 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;

4. Разработанные методики расчетов размеров секций сверхпроводящих токоограничителей и гистерезисных потерь при номинальном режиме работы энергосистемы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации, определены ее научная новизна и практическая ценность, дана информация о структуре и объеме работы.

В первой главе рассмотрена проблема непрерывно увеличивающихся токов КЗ в энергосистеме страны, которая вызвана рядом причин, основные из которых:

- отставание развития сетей от роста потребления электроэнергии;
- старение оборудования в сетях, введенного в основном в 70-80-е годы прошлого века;
- рост межсистемных перетоков при активной торговле электроэнергией;
- трудности взаимодействия сетевых операторов, принадлежащих разным субъектам рынка;
- сокращение расходов на обслуживание сетей в рыночных условиях;
- нехватка опытного эксплуатационного и диспетчерского персонала.

В связи с этим необходимо принимать дополнительные меры для защиты генерирующего, коммутационного и сетевого оборудования от все возрастающих токов КЗ, а также для надежного обеспечения потребителей электроэнергией высокого качества. Одними из таких мер могут быть:

- замена существующего коммутационного и сетевого оборудование на новое, способное выдержать более высокие значения токов КЗ;
- деление сети;
- осуществление мероприятий по ограничению и снижению уровня токов КЗ.

Следует отметить, что первый путь является сложным и высокочувствительным, второй приводит к снижению надежности системы. Наиболее привлекательным и экономически обоснованным является третий путь решения проблемы - осуществление мероприятий по ограничению и снижению уровня токов КЗ.

Были рассмотрены принципиальные конструкции резистивных и индуктивных токоограничивающих устройств, а также короткая линия постоянного тока, как токоограничивающее устройство.

Возможность использования высокотемпературных сверхпроводящих материалов при создании токоограничителей различных типов открывает новые горизонты для создания перспективного и высокоэффективного оборудования.

В связи с высокой стоимостью сверхпроводящих материалов большое значение при разработке сверхпроводящих устройств приобретает выбор рациональной геометрии, 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 $j_c(B)$ является индивидуальной характеристикой сверхпроводника, в работе используется зависимость вида

$$j_c = \frac{\alpha}{|B|^\gamma}, \quad (1)$$

где α и γ – константы, зависящие от свойств сверхпроводника.

Во второй главе рассматриваются сверхпроводящие токоограничители резистивного типа.

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

При проведении исследования полагалось, что токоограничитель имеет форму цилиндра, при этом диаметр много меньше длины (рис.1). Из рисунка видно, что секции в токоограничителе соединены последовательно так как для обеспечения достаточной степени токоограничения необходимо иметь относительно большое активное сопротивление в нормальном (несверхпроводящем) состоянии. Исключение составляют внутренняя и внешняя секции, которые соединены между собой параллельно и в них текут

половинные тока. Таким образом мы добиваемся того, что токи в соседних секциях имеют противоположные направления.

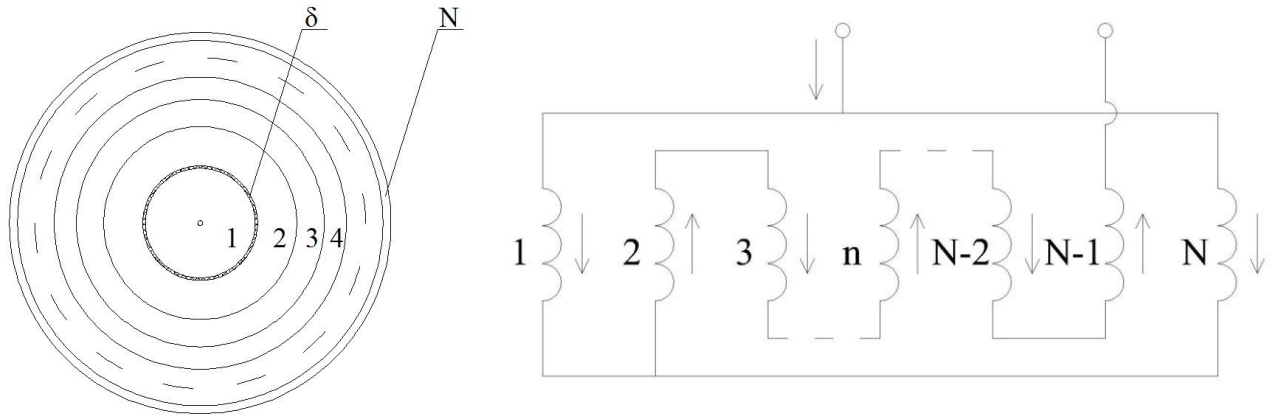


Рис.1. Схема расположения и электрического соединения секций ТУ

Методика расчета характеристик секционированного токоограничителя основана на применении закона полного тока к плоскому поперечному сечению устройства:

$$\text{rot}B = \mu_0 \cdot j_C, \quad (2)$$

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

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d}{d\rho}(\rho \cdot B) = \mu_0 \cdot \frac{\alpha}{|B|^\gamma}. \quad (3)$$

Решая (2), получим:

$$B_n(\rho) = \frac{\text{sgn}(A_n)}{\rho} \cdot \gamma + 1 \sqrt{A_n}, \quad (4)$$

$$A_n = (r_n \cdot B(r_n))^{\gamma+1} + \text{sgn}(J_n) \cdot \frac{\gamma+1}{\gamma+2} \cdot \mu_0 \cdot \alpha \cdot (\rho^{\gamma+2} - r_n^{\gamma+2}). \quad (5)$$

Здесь $B_n(\rho)$ - поле секции n в точке сверхпроводника с текущей координатой ρ , $B(r_n)$ - 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:

$$B(r_n) = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi \cdot r_n} \cdot \sum_{k=1}^{n-1} J_k. \quad (6)$$

Расчет по (4-6) начинается с внутренней секции - 1, 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:

$$J_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{\mu_0} \cdot B(R_1). \quad (7)$$

Этих данных достаточно для определения начальной величины поля в следующей секции по (6) и, следовательно, для расчета распределения поля в ней по (4), (5). Расчет следующих секций выполняется аналогично с учетом особенностей описанных ниже:

а) При $n \neq 1$ для расчета тока секции вместо (7) используется более общее соотношение, которое также следует из закона полного тока:

$$J_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_n}{\mu_0} \cdot [B(R_n) - B(r_n)] + \frac{R_n - r_n}{r_n} \cdot \sum_{k=1}^{n-1} J_k \quad (8)$$

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 (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 токоограничителя.

Общий характер зависимости экономии сверхпроводника от числа секций N и параметра γ представлен на рис. 2(а,б). Параметр G характеризует отношение объемов сверхпроводника V_N/V_3 , где V_3 – вариант токоограничителя, состоящий из трёх параллельно-последовательных секций. Соответственно, при расчетах параметр α и степень ограничения установившегося тока КЗ полагались постоянными для любого N и γ .

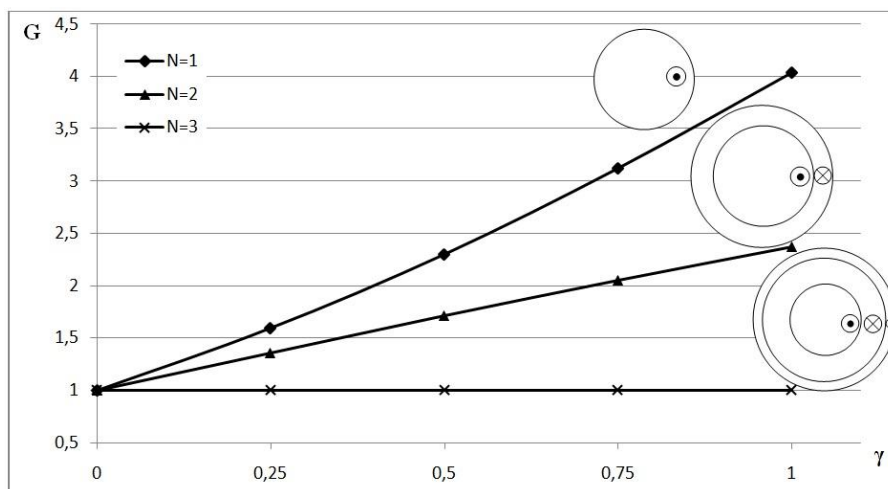


Рис. 2а. Сравнение количества сверхпроводника при варьировании количества секций N от 1 до 3. На вставке показаны конструкции токоограничителя

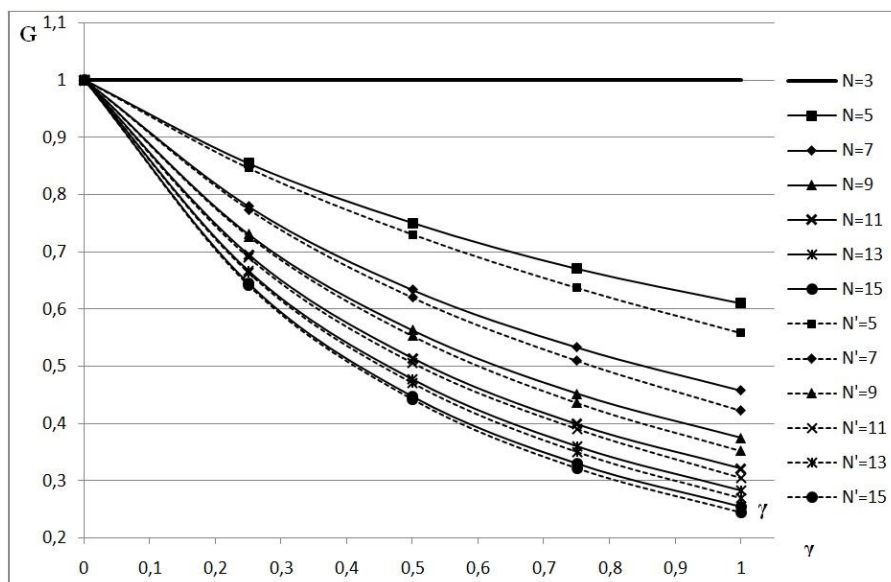


Рис. 2б. Сравнение расхода сверхпроводника при количестве секций $N=3 \div 15$

Рис. 2а показывает влияние секционирования на экономию сверхпроводника для $N=1 \div 3$. Варианты для большего количества секций показаны на рис. 2б. Здесь сплошными линиями представлены результаты расчетов для секций вплотную примыкающих друг к другу ($R_n=r_{n+1}$), пунктирными результаты расчетов, выполненные с учетом зазора между секциями, необходимого для электроизоляции.

Разработана методика расчета гистерезисных потерь адаптированная для различных конструкций сверхпроводящего резистивного токоограничителя.

Обобщенные результаты расчётов гистерезисных потерь в сверхпроводящем токоограничителе резистивного типа, выполненного в форме цилиндра, показаны на рис. 3.

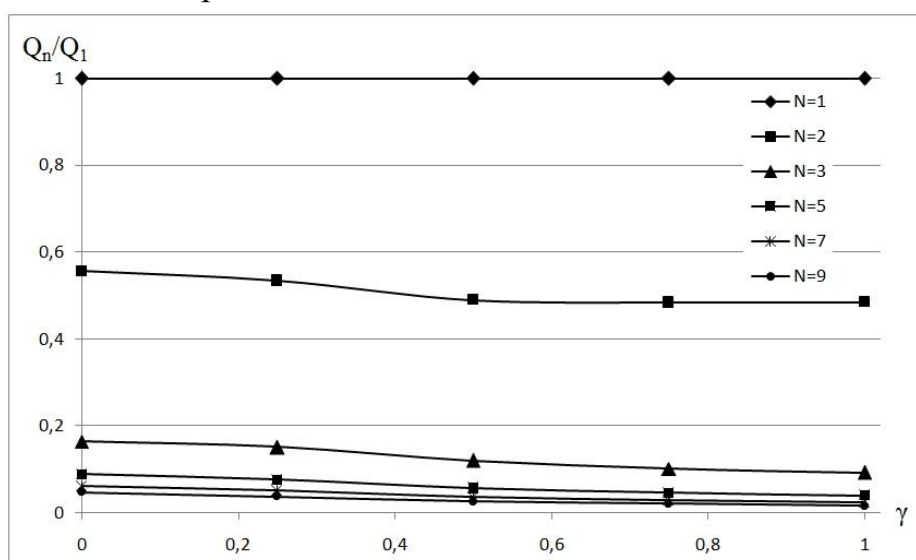


Рис. 3. Отношение гистерезисных потерь в оптимизированном секционированном токоограничителе к потерям в соответствующем эквивалентном односекционном цилиндрическом токоограничителе. Режим работы сети – номинальный.

На рисунке даны отношения удельных потерь (потерь на единицу длины сверхпроводника) секционированного токоограничителя к характеристикам эквивалентного токоограничителя, состоящего из одной секции. Для каждого варианта расчета, в качестве эквивалентного принимался цилиндрический токоограничитель, состоящий из одной секции, рассчитанный на те же значения тока и сопротивления в несверхпроводящем состоянии. Естественно, что одинаковыми принимались и свойства материала – коэффициенты α и γ . Как видим, благодаря использованию секционированного токоограничителя возможно достичь (в зависимости от свойств сверхпроводника и количества секций) экономии расхода сверхпроводящего материала до 90% (см. рис. 2.а и 2.б), и снижение 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.

В третьей главе приводится анализ различных схем и конструкций сверхпроводящих токоограничителей индуктивного типа. Разработана методика расчета токоограничивающих устройств трансформаторного и автотрансформаторного типа.

Принципиальная схема токоограничителя трансформаторного типа без стального сердечника приведена на рис. 4.

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:

$$L \cdot \frac{dJ_1}{dt} + M \cdot \frac{dJ_2}{dt} + R \cdot J_1 = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) , \quad (9)$$

$$L_2 \cdot \frac{dJ_2}{dt} + M \cdot \frac{dJ_1}{dt} + (R_2 + R_V) \cdot J_2 = 0 , \quad (10)$$

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, φ_0 - фаза. За начало отсчета времени принимается момент, в который значение тока сети в номинальном режиме равно нулю.

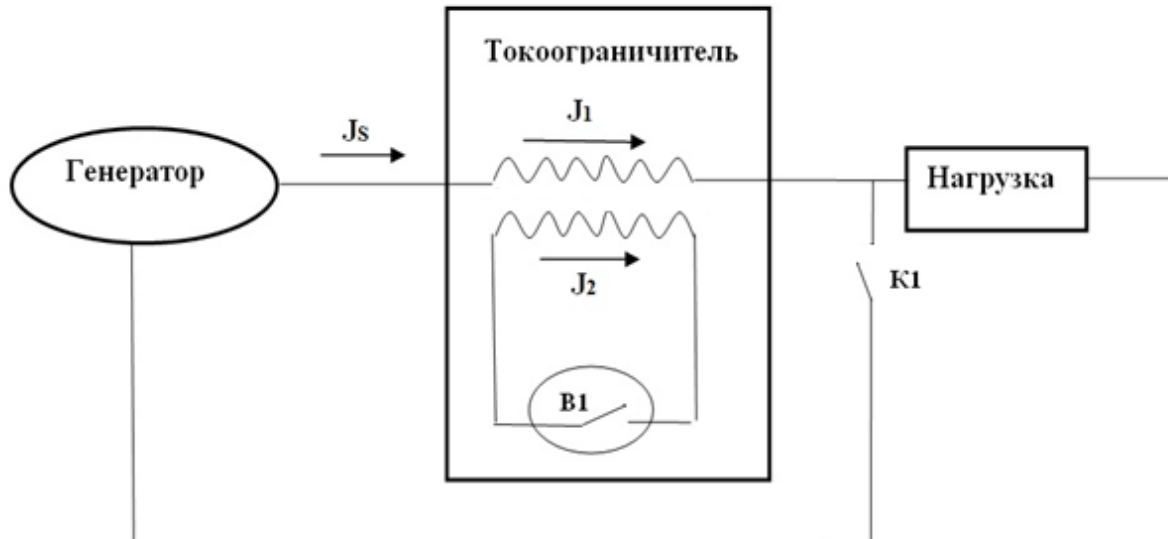


Рис.4. Схема включения токоограничителя трансформаторного типа

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. 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:

$$R_V = k_R \cdot (dt + 0,001 \cdot dt^6), \quad (11)$$

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 выбран на основании данных эксперимента по размыканию сети. 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 (9).

Особенность токоограничителя автотрансформаторного типа состоит в том, что его обмотки связаны не только индуктивно, но и гальванически (см. схему на рис. 5). 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_{Σ} .

В процессе размыкания выключателя В2, 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.

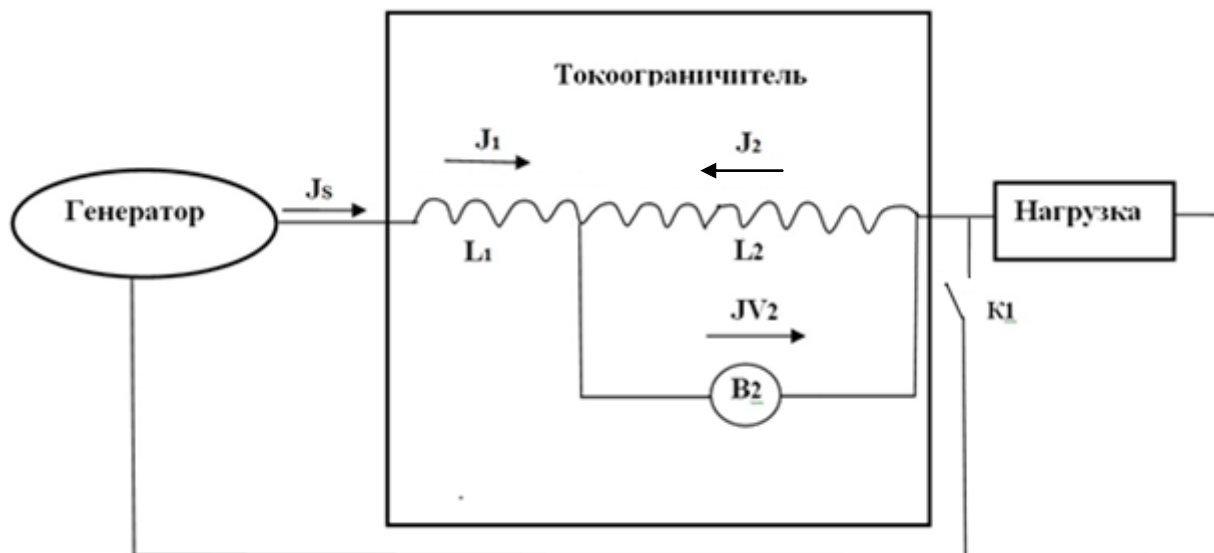


Рис.5. Схема включения токоограничителя автотрансформаторного типа

При наличии двух секций, из которых секция L_1 не содержит выключателя, а секция L_2 короткозамкнута, распределение токов определяется системой из двух дифференциальных уравнений:

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

$$M_{12} \cdot \frac{dJ_S}{dt} + L_2 \cdot \frac{dJ_2}{dt} = R_{V2} \cdot (J_S - J_2) - R_2 \cdot J_2. \quad (13)$$

Здесь R_2 , J_2 - активное сопротивление и ток секции L_2 , M_{12} - взаимная индуктивность секций L_1 и L_2 , R_{V2} - сопротивление выключателя секции L_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 (13), а (12) принимает вид:

$$(L_1 + L_2 + M_{12} + L_g) \cdot \frac{dJ_S}{dt} = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) - (R_1 + R_2 + R_g) \cdot J_S .$$

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:

$$U_{V2} = (L_2 + M_{12}) \cdot \frac{dJ_2}{dt} - J_2 \cdot R_2 . \quad (14)$$

Согласно технической характеристике выключателя, напряжение на нем в течение всего периода отключения не должно превышать 70 кВ. 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 кВ и выше). Выходом из этой ситуации является использование вместо секции L2 нескольких последовательно соединенных секций, каждая из которых замкнута собственным выключателем. Для расчета такой схемы может использоваться система уравнений, аналогичная (12,13). 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.

В качестве исходных данных для индуктивных токоограничителей обозначенных типов принималось: номинальное напряжение – 127 кВ; номинальный ток (в нормальном режиме работы сети) – 2 кА; падение напряжения на токоограничителе в номинальном режиме – 1 кВ; ток срабатывания защиты ограничителя – 5 кА; ударный ток – 15 кА; допустимое время размыкания вторичной обмотки токоограничителя - от 1 до 10 мсек.

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_{Σ}) 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. Значит, определенное исходными данными отношение 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.

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) использовалась 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 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.

Результаты расчетов для четырех приведенных конструкций (№1, №2 – токоограничитель трансформаторного и автотрансформаторного типа соответственно с обмотками, выполненными с использованием традиционных проводников; №3,4 – токоограничитель автотрансформаторного и трансформаторного типа, с обмотками выполненными с использованием высокотемпературных сверхпроводящих материалов) представлены в таблице 1.

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.

Таблица 1. Результаты расчетов токоограничителей

Тип токоограничителя	№1	№2	№3	№4
Внутренний диаметр обмотки [м]	2,15	1,45	1,5	2,15
Внешний диаметр обмотки [м]	2,98	2,9	2,5	2,98
Высота обмотки [м]	1,9	0,835	1,0	1,55
Общее число витков	240	206	206	240
количество дисковых катушек	-	9	-	-
Общий вес обмотки [Т]	26,9	18,3	0,56	1,1
Тепловые потери в номинальном режиме [кВт]	296	178,2	18*	42*
Индуктивность в номинальном режиме [мГн]	1,28	1,56	1,4	1,12
Индуктивность в режиме «ограничения тока» [мГн]	76,5	76,8	77,1	76,3
Максимальный ток в переходном процессе [кА]	14,0	14,2	14,1	14,04
Максимальный ток в режиме «ограничения тока» [кА]	7,25	7,23	7,3	7,27

* Потери даны с учетом холодильного коэффициента $K_x=10$.

При этом известно, 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.

В результате расчетов было установлено, что автотрансформаторная схема соединения обмоток предпочтительнее трансформаторной, поскольку даёт снижение значительное снижение массы и общих потерь (в 1,5 и более чем в 1,7 раза) уже при использовании традиционных проводников. При использовании сверхпроводящих материалов эта разница становится еще более заметной – разница в массе между токоограничителем, выполненным по трансформаторной схеме с использованием традиционных проводников и токоограничителем, выполненным по автотрансформаторной схеме с использованием сверхпроводящих материалов, составляет 48 раз, разница по тепловым потерям в номинальном режиме работы сети – до 16,5 раз.

На рис. 6-8 представлены результаты расчетов переходных процессов в зависимости от времени возникновения КЗ. Так как все варианты токоограничителей были рассчитаны на одни и те же исходные параметры переходные процессы для них будут качественно одинаковы, поэтому представлены переходные процессы, рассчитанные для одного из представленных вариантов (вариант №2).

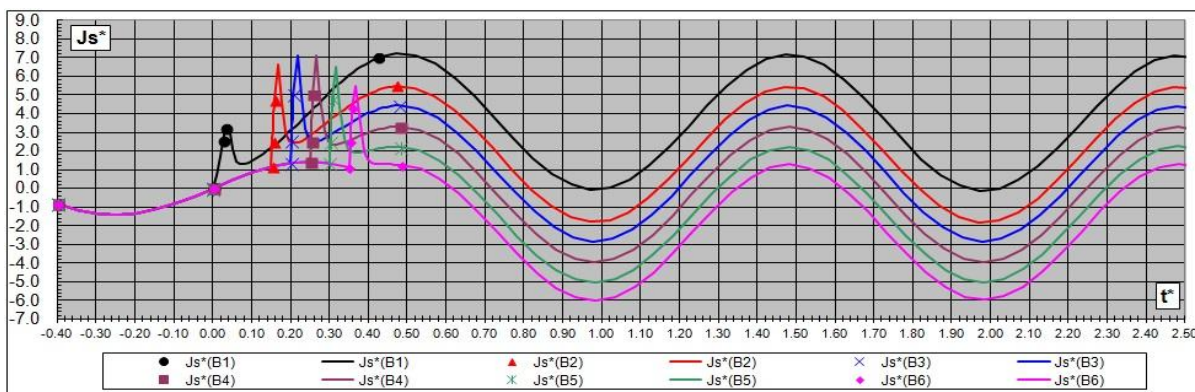


Рис.6. Изменение тока сети в переходном процессе в зависимости от момента возникновения КЗ

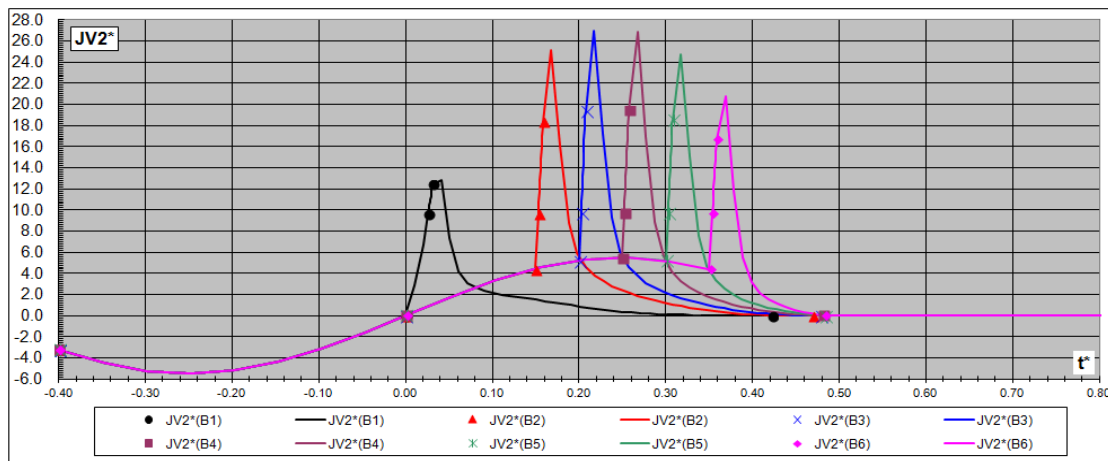


Рис. 7. Изменение тока через выключатель в переходном процессе в зависимости от момента возникновения КЗ

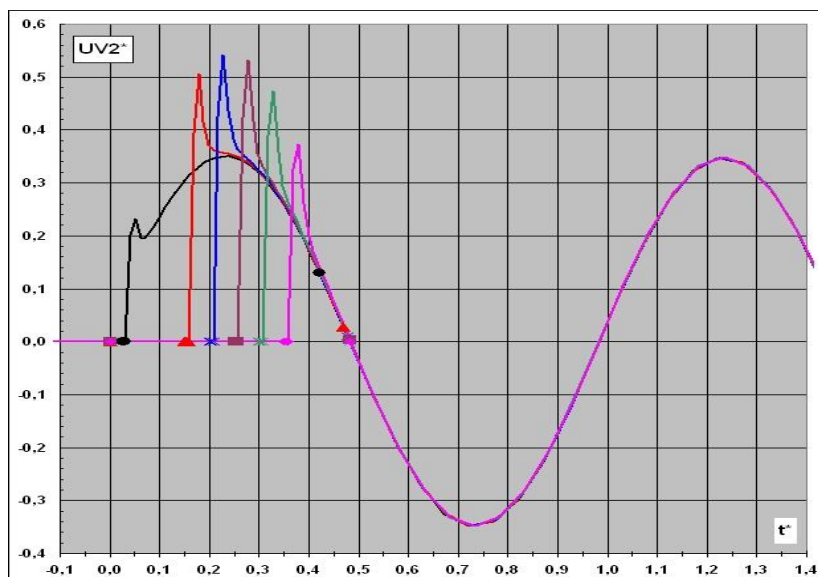


Рис. 8. Изменение напряжения на выключателе в переходном процессе для токоограничителя №2 в зависимости от момента возникновения КЗ

В четвёртой главе рассмотрены короткие сверхпроводящие линии постоянного тока, как ограничители сверхнормативных токов КЗ.

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 электропередачи – униполярную и биполярную. В нашей работе рассматривается биполярная электропередача.

Так как в данном случае токоограничение происходит за счет преобразователей, расположенных на концах линии, основной задачей и целью является – максимально эффективная передача энергии по сверхпроводящему кабелю от одной подстанции (энергетического узла) к другой. Для реализации данной задачи была разработана методика коаксиального секционирования, аналогичная методике секционирования, представленной для сверхпроводящего токоограничителя резистивного типа. Сечение кабеля разбивается на несколько соосных секций, которые подключаются так, что токи в соседних секциях текут во взаимно противоположных направлениях (при этом секции с токами одного направления соединены параллельно между собой). Модель такого кабеля представлена на рис. 9.

Результаты расчетов распределения магнитного поля по сечению кабеля, количества сверхпроводящего материала и гистерезисных потерь в номинальном режиме работы представлены на рис. 10-12.

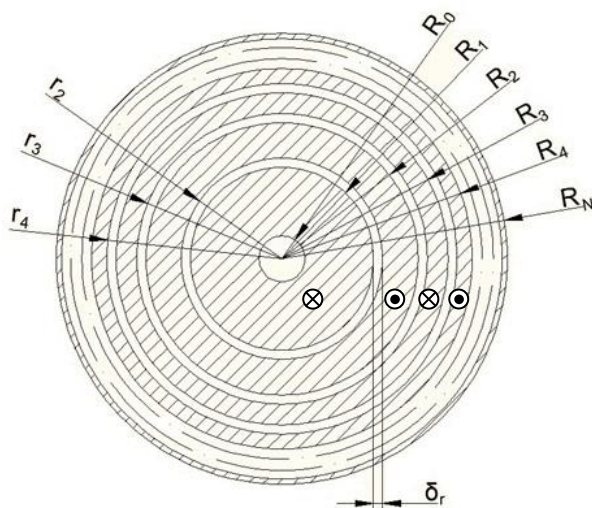


Рис. 9. Модель секционированного кабеля. R_n , r_n – внешний и внутренний радиусы секции n , δ_r – зазор между секциями, R_0 – радиус формера, R_N – габаритный радиус кабеля.

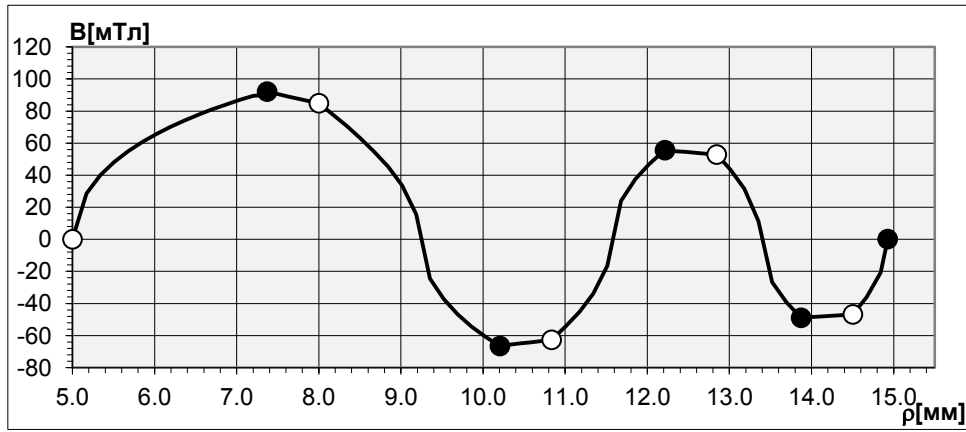


Рис.10. Распределение магнитного поля по сечению пятисекционного кабеля $J_c=13,6$ кА, $R_0=5$ мм, $\delta=0,63$ мм. ○ – начала секций, ● – окончания секций.

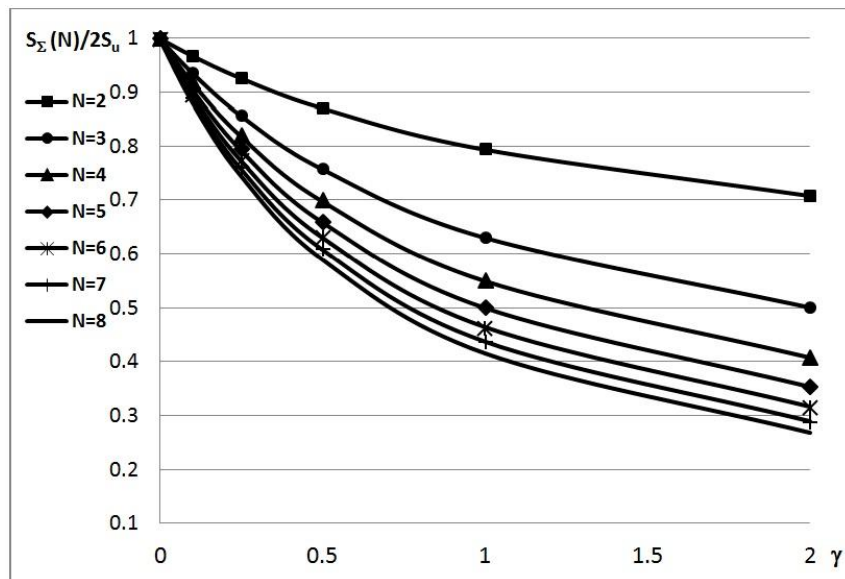


Рис.11. Отношение расхода сверхпроводящего материала в секционированном кабеле к расходу материала в варианте биполярной передачи с использованием двух униполярных кабелей

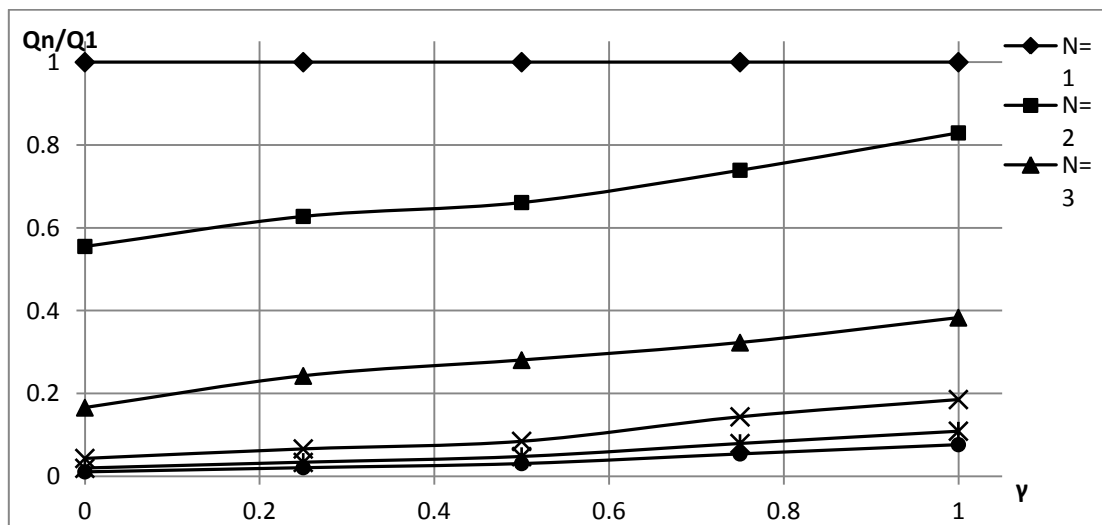


Рис.12. Отношение гистерезисных потерь в оптимизированном секционированном кабеле к потерям в соответствующем эквивалентном односекционном цилиндрическом кабеле. Режим работы сети – нормальный

В зависимости от параметров сверхпроводника и количества секций разница в количестве материала в секционированной системе может быть более чем на порядок в отличие от несекционированной системы, рассчитанной на те же параметры. Гистерезисные потери в номинальном режиме работы могут отличаться более чем в 20 раз в пользу секционированной системы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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:

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

2. Предложены варианты различных конструкций секционированных токоограничителей: резистивный, индуктивный и короткая кабельная линия постоянного тока.

Показано, что использование секционирования обеспечивает существенную экономию сверхпроводящего материала и значительно уменьшает гистерезисные потери. Дополнительным преимуществом резистивных токоограничителей и коротких кабельных линий постоянного тока является их компактность и экологическая чистота (отсутствие внешних магнитных полей).

3. 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.

4. Исследованы сверхпроводящие токоограничители индуктивного типа, выполненные по трансформаторной и автотрансформаторной схеме.

5. 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.

6. 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. При этом использование сверхпроводника позволяет снизить электрические потери более чем в 7 раз.

7. 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).

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

Публикации по теме диссертации:

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Копылов С.И., Желтов В.В., Кривецкий И.В., Сытников В.Е. Оптимизация характеристик высокотемпературных сверхпроводящих кабелей путём их секционирования // *Электричество*. – 2012.-№12.-С. 60-62.

2. Копылов С.И., Желтов В.В., Кривецкий И.В., Сытников В.Е. Влияние секционирования на характеристики сверхпроводящего резистивного токоограничителя // *Электротехника*. – 2013.- №12.- С. 25-28.

Публикации в других изданиях

3. Сытников В.Е., Копылов С.И., Бемерт С.Е., Иванов Ю.В., Кривецкий И.В., Риморов. Д.С., Ромашов М.С., Шакарян Ю.Г., Бердников Р.Н., Дементьев

Ю.А., Горюшин Ю.А., Тимофеев Д.Г., HTC DC Cable Line Project: On Going Activities in Russia, IEEE Trans. Appl. Supercond. V.23(3), June 2013, 5401904.

4. Копылов С.И., Балашов Н.Н., Желтов В.В., Кривецкий И.В., Сытников В.Е., Sectioning of a High Current Cable, IEEE Trans. Appl. Supercond. V.23(3), June 2013, 5402703.

5. 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.

6. Сытников В.Е., Шакарян Ю.Г., Кривецкий И.В., «ВТСП передача постоянного тока как элемент «интеллектуальной сети» крупных городов», Мат-лы 1-й национальной конференции по прикладной сверхпроводимости НКПС – 2011, 6-8 декабря 2011г., НИЦ «Курчатовский институт» С. 294-298.

7. 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.

8. 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.

9. Желтов В.В., Копылов С.И., Кривецкий И.В., Сытников В.Е., Шакарян Ю.Г. Двухжильный сверхпроводящий кабель. // Патент на полезную модель RU№123210, МПК H01B 11/18, опубликован 20.12.2012.

10. Желтов В.В., Копылов С.И., Кривецкий И.В., Сытников В.Е., Шакарян Ю.Г. Трехжильный сверхпроводящий кабель. Патент на полезную модель RU№123211, МПК H01B 11/18, опубликован 20.12.2012.

11. Желтов В.В., Копылов С.И., Кривецкий И.В., Сытников В.Е., Шакарян Ю.Г. Сверхпроводящий кабель. Патент на полезную модель RU№123212, МПК H01B 11/18, опубликован 20.12.2012.

12. Желтов В.В., Копылов С.И., Кривецкий И.В., Сытников В.Е., Шакарян Ю.Г. Многожильный сверхпроводящий кабель. Патент на полезную модель RU№123213, опубликован 20.12.2012.