Фетисов, Сергей Сергеевич. Разработка методик и исследование электрофизических и теплофизических процессов в перспективных электротехнических изделиях на основе высокотемпературных сверхпроводников : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.02 / Фетисов Сергей Сергеевич; [Место защиты: Всерос. науч.-исслед. и проект.-конструкт. технол. ин-т кабельной пром-сти].- Москва, 2011.- 133 с.: ил. РГБ ОД, 61 11-5/3196

**Введение к работе**

**Актуальность темы**

Явление сверхпроводимости всегда привлекало исследователей и разработчиков, электроэнергетических и электротехнических устройств из-за снижения потерь при нулевом сопротивлении.

В конце 90-х годов прошлого века работы по созданию сверхпроводящих силовых кабелей и других электротехнических устройств получили новый импульс с появлением высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Исследования, направленные на создание сверхпроводящих силовых кабелей и токоограничителей на основе высокотемпературных сверхпроводников, были начаты повсеместно за рубежом и в России. Это было обусловлено тем фактом, что в качестве хладагента используется более дешёвый и доступный жидкий азот, который позволяет использовать сравнительно недорогие криостаты, надежные и более экономичные системы криогенного обеспечения.

С появлением ВТСП-проводов второго поколения (ВТСП-2) начался прогресс в исследованиях и разработках силовых кабелей и других электротехнических устройств с использованием ВТСП-2.

Во ВНИИКП давно ведутся исследования и разработки в области прикладной сверхпроводимости, главной целью которых является создание ВТСП кабельных линий для энергетики. Ведутся работы по созданию и других ВТСП-устройств на основе ВТСП как первого (1G), так и второго (2G) поколения. ВТСП силовые кабели - одно из наиболее эффективных и продвинутых применений сверхпроводимости.

Одной из основных электрофизических проблем использования ВТСП кабельных линий является уровень потерь на переменных токах. Значительная работа была проделана, чтобы снизить потери в силовых кабелях, в которых используется ВТСП-провода первого поколения. При использовании сравнительно новых ВТСП-проводов второго поколения возникают некоторые новые проблемы, которые необходимо исследовать. Высокая плотность критического тока слоя 2G ВТСП-провода и его малая толщина уменьшают поверхностные потери в сверхпроводнике. Однако, при этом возникают потери, связанные с возмущением магнитного поля в зазорах между лентами кабеля и из-за несбалансированности тока в слоях кабеля, а также ферромагнитные потери в 2G лентах с подложками из магнитного материала.

Важная теплофизическая проблема при создании ВТСП-кабелей, а особенно ограничителей тока, связана с необходимостью данных устройств работать при токах значительно выше критического: оборудование должно остаться работоспособным после воздействия токов К.З. Проблема защиты электрооборудования от воздействия токов короткого замыкания становится все более сложной при увеличении размеров энергосистемы и повышении уровня напряжения при передаче энергии. При этом ВТСП-устройства охлаждаются

жидким азотом и основные теплофизические процессы - это динамика перехода ВТСП в нормальное состояние, а также нестационарная теплоотдача к жидкому азоту.

Упомянутые проблемы являются весьма актуальными и обуславливают выбор направления диссертационной работы.

**Цель работы**

- Создание и развитие методик для всесторонних испытаний  
репрезентативных моделей ВТСП-кабелей, экспериментального исследования  
потерь и их численного моделирования в 2G ВТСП-кабелях.

- Создание и развитие методик экспериментального исследования  
процесса перехода ВТСП-проводов в нормальное состояние, численного  
моделирования процесса перехода ВТСП-проводов в нормальное состояние с  
учетом реальных переходных характеристик ВТСП-проводников,  
моделирование нестационарных процессов теплоотдачи с поверхности ВТСП-  
проводов в жидкий азот.

Исследование и анализ потерь в 2G ВТСП-кабелях.

Исследование и анализ поведения ВТСП-проводников, охлаждаемых жидким азотом, при перегрузках током.

**Научная новизна.**

- Разработана экспериментальная методика для измерения потерь в  
полномасштабных по сечению ВТСП-кабелях.

Исследованы потери в 2G ВТСП-кабелях.

Разработана математическая модель для расчета потерь в 2G ВТСП-кабеле.

- Предложен метод для расчета вклада гистерезисных потерь в 2G  
ВТСП-кабеле, возникающих в подложках лент из магнитного материала.

- На основе расчетных моделей проведен анализ полученных  
экспериментальных результатов потерь в 2G ВТСП-кабелях.

- Разработана экспериментальная методика исследования тепловых  
процессов в ВТСП-проводниках при токах выше критического.

- Предложена численная модель, которая описывает динамику  
разогрева ВТСП-проводов с учётом влияния дополнительной задержки кипения  
азота, связанной с его перегревом.

- Проведены экспериментальные и расчетные исследования поведения  
ВТСП-проводников, охлаждаемых жидким азотом, при перегрузках током.

**Достоверность**

Достоверность результатов диссертации обеспечена корректной постановкой математических задач, строгими математическими выводами, использованием обоснованных методов численных расчётов, а также совпадением результатов вычислений с экспериментальными данными.

**Практическая ценность**

Создан уникальный стенд для всесторонних испытаний репрезентативных моделей ВТСП-кабелей. На основе экспериментальных исследований, получены зависимости потерь от введенного тока в кабель для полномасштабных по сечению моделей ВТСП-кабелей из лент второго поколения. Получены экспериментальные данные по влиянию слабомагнитной подложки исходной ленты на величину потерь в модели кабеля. На основе предложенной математической модели разработана методика и программное обеспечение, позволяющие провести расчет потерь в ВТСП-кабелях.

Так же были определены коэффициенты теплоотдачи от поверхности ВТСП-лент к азоту при нестационарном режиме теплообмена, для изолированного и неизолированного ВТСП-проводника. Эти данные необходимы для конструирования и анализа поведения ВТСП-кабелей и сверхпроводящих ограничителей токов при воздействии токов короткого замыкания.

**Автор защищает**

**1.**Методику для всесторонних испытаний репрезентативных моделей  
ВТСП-кабелей и методику для измерения потерь в полномасштабных по  
сечению сверхпроводящих кабелях.

2. Результаты экспериментальных исследований и полученные  
зависимости потерь при переменном токе в полномасштабных моделях ВТСП-  
кабелей из лент второго поколения.

1. Расчетные методики потерь в 2G ВТСП-кабелях и результаты расчетов.
2. Методику экспериментальных исследований тепловых процессов в ВТСП-проводниках при токах выше критического.
3. Численную модель расчета перехода в нормальное состояние ВТСП-проводников с учетом реальных переходных характеристик ВТСП-проводников и реальных коэффициентов теплоотдачи к жидкому азоту.
4. Результаты экспериментальных и расчетных исследований поведения ВТСП-проводников при перегрузках током.

**Апробация работы**

Материалы, которые легли в основу диссертации, опубликованы в работах [1-16], и докладывались на Европейских конференциях по прикладной сверхпроводимости EUCAS 2007 (Бельгия, Брюссель, 2007) и EUCAS 2009 (Дрезден, Германия, 2009), на конференциях по прикладной сверхпроводимости ASC-2006 (Сиэтл, США, 2006), ASC-2008 (Остин, США, 2008) и ASC 2010 (Вашингтон, США, 2010), на международных конференциях ССА-2008 (Барселона, Испания, 2009) ССА-2010 (Фукуока, Япония, 2010).

**Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе в изданиях по перечню ВАК - 8 работ. Получен 1 патент на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Материалы изложены на 133 страницах, содержат 85 рисунков и 8 таблиц. Список литературы состоит из 81 наименований.