



ГОСКОРПОРАЦИЯ «РОСАТОМ»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

«НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»

(АО «НИИЭФА»)

196641, Санкт-Петербург, поселок Металлострой, дорога на Металлострой, дом 3

Телефон: (812) 464-44-70, факс: (812) 464-46-23, <http://www.niiefa.spb.su>

ОКПО 008626377, ОГРН 1137847503067, ИНН / КПП 7817331468 / 781701001

16.10.2017 № 222-4.1-26/493

На № АС-3/17 от 30.08.2017

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

Акционерного Общества

«НИИЭФА им. Д. В. Ефремова»

А.В. Ванин



« ___ » _____ 2017 г.

Отзыв ведущей организации

Акционерного Общества «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова»

на диссертацию Зубко Василия Васильевича

«Моделирование теплофизических и электрофизических процессов для исследования и оптимизации конструкций сверхпроводящих кабелей и проводов», представленную

на соискание учёной степени доктора технических наук

по специальности 05.09.02 - электротехнические материалы и изделия

Актуальность темы диссертации

В последние десятилетия достигнут значительный прогресс в области прикладной сверхпроводимости. Низкотемпературные сверхпроводники (НТСП), работающие при температуре жидкого гелия, достаточно давно нашли широкое применение в электрофизических устройствах, используемых в науке (ускорители и УТС), медицине (томографы) и других отраслях экономики. Следующий виток развития связан с применением высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), способных работать вплоть до температуры жидкого азота. В частности, в реальные

энергосистемы уже устанавливаются ВТСП силовые кабели - одно из наиболее эффективных применений прикладной сверхпроводимости, способных стать основой энергетики будущего.

Использование НТСП в магнитных системах ускорителей обусловлено развитием физики высоких энергий. Постоянно возрастающие требования к величине и однородности магнитного поля в канале пучка предопределяют необходимость увеличения конструктивной плотности тока в обмотках. Использование НТСП позволяет оптимизировать массу и стоимость магнитов, однако, с определенного уровня, дальнейшее повышение конструктивной плотности тока приводит к невозможности использования полностью стабилизированных сверхпроводников. Как следствие, возникает необходимость решения задач динамической стабильности, что напрямую связано с защитой НТСП обмоток от разрушения при переходе в нормальное состояние. Для быстроциклирующих НТСП магнитов требование снижения мощности динамических тепловыделений потребовало разработки НТСП проводов новой конструкции, а значит разработки новых математических подходов к определению критериев стабильности.

Развитие и предполагаемое широкое внедрение в электроэнергетику силовых ВТСП кабелей переменного тока потребовало моделирования их работы в номинальных и аварийных условиях с целью оптимизации уровня потерь. Повышение точности расчетов предопределило создание и дальнейшее развитие моделей для оптимизации коаксиальных и триаксиальных кабелей.

Компьютерное моделирование – один из основных методов разработки конструкций и методов исследования электротехнических изделий нового поколения, к которым несомненно относятся сверхпроводящие кабели и провода. На современном этапе задача проведения численных исследований выдвигает требования повышения точности и адекватности математических моделей, описывающих работу устройств в нестационарных условиях. Во многих случаях необходимо применение комбинированных методов для получения математического описания объекта.

Исходя из вышесказанного, тема диссертации является весьма актуальной, имеет значительную новизну и большое практическое значение.

Основные результаты диссертации и их новизна

Новизна результатов основана на следующих положениях:

1) Разработаны и использованы на практике варианты математической модели, обеспечивающей оценку стабильности (устойчивости к любым видам возмущений) НТСП кабелей, используемых в быстроциклирующих магнитах ускорителей. Модель основана на использовании сопряженных дифференциальных уравнений, описывающих теплофизические и электромагнитные процессы в магнитах во время ускорительных циклов.

2) Получен обширный массив расчетных данных, описывающих стабильность и обосновывающих требования к НТСП кабелям для быстроциклирующих дипольных, квадрупольных и корректирующих магнитов ускорителя SIS300.

3) Разработана математическая модель для определения минимальной энергии перехода в нормальное состояние НТСП стрендов в кабеле с промежуточным элементом между слоями. Модель основана на использовании сопряженных дифференциальных уравнений, детально описывающих тепловые и электрические процессы в момент начала и развития процесса перехода в нормальное состояние НТСП стренда в кабеле. Проведенные теоретические исследования показали, что кабель с промежуточным элементом обладает повышенной стойкостью к локальным тепловым возмущениям и может быть применен в обмотках быстроциклирующих магнитов ускорителей. Для увеличения стабильности подобных НТСП кабелей предложено выбирать рабочий ток в НТСП кабеле с промежуточным элементом между слоями ниже уровня тока, при котором изменяется режим устойчивости отдельного стренда к локальным тепловым возмущениям.

4) Разработана компьютерная модель для расчета нестационарных теплофизических и электромагнитных процессов в обмотках сверхпроводниковых магнитов, которая позволяет рассчитывать переход обмоток в нормальное состояние с учетом реальной переходной (вольт-амперной) характеристики используемого сверхпроводника.

5) Впервые разработана математическая модель для расчета нестационарных процессов в ВТСП кабелях при коротком замыкании в цепи. Модель основана на использовании сопряженных дифференциальных уравнений, описывающих тепловые и электрические процессы. Обоснована конструкция формеров и каналов охлаждения азотом в силовых коаксиальных кабелях на основе ВТСП лент первого поколения.

6) Предложен новый подход к математическому моделированию поведения ВТСП лент первого и второго поколений, охлаждаемых азотом, при перегрузках током. Подход основан на использовании сопряженных дифференциальных

уравнений, описывающих тепловые и электрические процессы в ВТСП лентах. Впервые в исследованиях одновременно учтена реальная переходная характеристика сверхпроводников и нелинейная теплоотдача в кипящий азот. С помощью разработанной модели детально исследована и впервые объяснена причина различия изменения напряжения в ВТСП лентах, охлаждаемых азотом, при перегрузках током.

7) Разработана компьютерная модель для детального исследования нестационарных процессов в кабелях на основе ленточных ВТСП второго поколения (ВТСП-2). Проведено теоретическое исследование потерь в кабелях на основе ВТСП-2 лент.

8) Созданы новые взаимодополняющие математические модели для оптимизации конструкции коаксиальных и триаксиальных силовых ВТСП кабелей переменного тока.

Достоверность полученных результатов

Корректность разработанных моделей подтверждается использованием современных численных методов. Полученные результаты сопоставимы с данными других исследователей и хорошо согласуются с ними. Достоверность результатов подтверждается:

1) Успешными испытаниями сверхпроводниковых магнитов и ВТСП кабелей, разработанных с использованием предложенных в диссертации компьютерных моделей.

2) Представлением результатов, сформулированных в диссертации, на международных российских и европейских конференциях по ускорителям и международных конференциях по магнитным технологиям и прикладной сверхпроводимости.

3) Экспертизами диссертационных результатов, проведенными при подготовке препринтов ИФВЭ им. А.А. Логунова, статей в российских журналах “Атомная энергия”, “Холодильная техника”, “Кабели и провода”, “Электричество”, сб. “Инновационные технологии в энергетике”, а также публикаций в зарубежных изданиях IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Physics Procedia.

Практическая значимость

Практическое значение результатов работы определяется тем, что разработан комплекс численных моделей, позволяющий исследовать теплофизические и

электрофизические процессы в нестационарных режимах.

Итогом проведенных исследований является выбор и обоснование НТСП кабелей для первых в России быстроциклирующих магнитов и первых в России коаксиальных и триаксиальных ВТСП кабелей.

К достоинствам диссертации следует отнести в первую очередь ее теоретико-экспериментальный характер, при котором теоретический материал подкрепляется экспериментальной проверкой. Таким образом, диссертация имеет высокий научный уровень.

Публикации и апробация

Работа прошла всестороннюю апробацию, её результаты докладывались на конференциях всероссийского и международного уровней и различных научных семинарах. Основные результаты диссертации опубликованы в 46 основных опубликованных научных работах, включая 33 публикации в рецензированных журналах и других изданиях по перечню ВАК РФ.

Общая оценка содержания работы и замечания

Диссертационная работа В.В. Зубко представляет собой завершённое исследование, в котором успешно решены поставленные перед диссертантом задачи.

Оформление диссертации и автореферата выполнено согласно требованиям ВАК. Содержание автореферата полностью соответствует диссертации.

Положительно характеризуя работу В.В. Зубко, можно высказать следующие замечания:

1. Разделы диссертации, посвященные подходам к моделированию НТСП проводов для быстроциклирующих магнитов ускорителей и ВТСП кабелей для электроэнергетики, практически, не связаны между собой, не объединены идеями, характеризующими усилия автора в части обобщения и развития данных подходов.

2. Следует отметить, что, не умаляя достижения автора в части решения поставленных им конкретных задач, аналогичный сопряженный подход к оптимизации НТСП кабелей для обмоток магнитной системы токамаков был предложен и программно реализован в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова в конце 90-х годов С.А. Егоровым. Результаты работ опубликованы: «Up-grade of the CICC stability analysis taking into account a current imbalance between strands in multistage cables», IEEE Transactions on Applied Superconductivity, April 2000.

3. В тексте диссертации содержится повторения, некоторых формул, например, формула (4.6) является фактически повторением формулы (2.3).

4. Представляется, что автору следовало более подробно раскрыть численную модель для расчета нагрева однофазного гелия вдоль криогенной цепочки магнитов ускорителя.

5. Представляется, что автору следовало более четко обосновать замену 3-х мерной геометрии на 2-х мерную при расчете потерь в ВТСП кабеле.

Данные замечания не влияют на общую высокую оценку работы и не ставят под сомнение основные результаты и выводы, полученные в диссертации. В целом диссертационная работа В.В. Зубко представляет законченное научное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Проведенная диссертантом работа имеет перспективы как в научном, так и в практическом плане.

Заключение по работе

Оформление диссертации соответствует принятым правилам и стандартам. Автореферат отвечает содержанию диссертации. Язык и стиль автореферата ясны и лаконичны. В опубликованных автором работах достаточно полно отражены основные результаты и положения диссертации.

Диссертационная работа В.В. Зубко выполнена на высоком научно-техническом уровне и является законченной научно-исследовательской работой. По содержанию и полученным научным результатам диссертационная работа является научно-квалификационной работой, в которой на основе проведенных исследований решена крупная научная проблема по оптимизация новых СП кабелей для быстроциклирующих магнитов и электроэнергетики, имеющая важное практическое значение для прикладной сверхпроводимости.

Результаты, полученные автором диссертации, могут быть использованы в научных коллективах, ведущих российских центров занимающихся прикладной сверхпроводимостью (ОИЯИ, РНЦ КИ и т.д). Выводы диссертации достаточно обоснованы. Работа отвечает требованиям "Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям", утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а В.В. Зубко заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.02 – "Электротехнические материалы и изделия".

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании научно-технического совета
отделения НТЦ «Синтез» АО «НИИЭФА», протокол № 11 от 11 октября 2017 г.

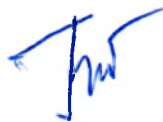
Присутствовало на заседании 19 чел. Результаты голосования: «за» - 19 чел,
«против» - нет «воздержались» - нет.

Отзыв подготовил начальник отдела
сверхпроводящих магнитных систем
отделения НТЦ «Синтез» АО «НИИЭФА»,
кандидат технических наук



И.Ю. Родин

Председатель секции НТС
отделения НТЦ «Синтез» АО «НИИЭФА»,
директор отделения НТЦ «Синтез»,
доктор физико-математических наук, профессор



В. А. Беляков

Ученый секретарь секции НТС
отделения НТЦ «Синтез» АО «НИИЭФА»,
ведущий научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук



Б. В. Люблин