


«Утверждаю»

И.о. проректора по научной работе
ФГБОУ ВО «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский
университет)» (МАИ)
профессор, д.т.н.



Равич Ю. А.

« ____ »

2022



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Фетисова Сергея Сергеевича «Исследования и разработка токонесущих элементов коаксиальных кабелей, токовводов и проводников на основе высокотемпературных сверхпроводящих материалов второго поколения», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.09.02 - Электротехнические материалы и изделия

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИИ

Применение сверхпроводниковых технологий, в том числе с использованием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) позволяет в настоящее время создавать экологичное, с меньшей массой электрооборудование, а также уникальные электрофизические устройства.

В настоящее время достижения в области разработок и производства высокотемпературных сверхпроводящих лент второго поколения (ВТСП-2) с улучшенными характеристиками открыли путь для разработки новых силовых кабелей и внедрения в энергосети более эффективных электротехнических устройств, а также обеспечили новые возможности создания магнитных систем различного назначения, в том числе, исследовательских установок класса Мегасайенс. Для получения необходимых рабочих токов кабелей и устройств требуется объединение или комбинирование нескольких, от единиц до сотен, исходных ВТСП лент. Учитывая присущую базовым ВТСП-2 материалам анизотропию и несимметричность конструкции, это является весьма сложной и нетривиальной задачей, которая в мире до сих пор полностью не решена, хотя такие разработки ведутся достаточно активно.

В этой связи результаты работы Фетисова С.С., изложенные в диссертации и автореферате и направленные на создание токонесущих элементов (ТНЭ), кабелей, токовводов и проводников различного назначения на основе ВТСП-2 и создание базовых технологий их изготовления, являются весьма важными и актуальными.

Общей целью работы являлись комплексные исследования и разработка методов расчёта, оптимизация геометрии и технология изготовления компактных силовых кабелей и ТНЭ для магнитных систем на основе высокотемпературных сверхпроводников второго поколения, а также экспериментальная проверка изготовленных моделей компактных силовых ВТСП-2 кабелей и магнитных систем с ВТСП-2 ТНЭ. Для достижения поставленных целей было необходимо решить следующие задачи:

- создать современную экспериментальную базу, разработать методики измерений и провести исследования характеристик исходных ВТСП-2 лент, имеющихся на рынке;
- создать стенды и методики испытаний разработанных ТНЭ, кабелей, проводников и различных устройств на основе ВТСП-2 для исследования достигнутых характеристик и их соответствия задаваемым требованиям;
- разработать новые и усовершенствовать существующие математические модели для оптимизации конструкций ТНЭ, кабелей, проводников на основе ВТСП - 2;
- разработать технологии и изготовить прототипы ТНЭ, кабелей, проводников и устройств на основе ВТСП-2 для различных применений и провести их испытания по разработанным методикам;
- провести сравнение экспериментальных результатов по характеристикам испытанных прототипов ТНЭ, кабелей, проводников и устройств на основе ВТСП-2 с результатами, предсказанными с помощью разработанных математических моделей.

Именно комплексность и разносторонность проведенных исследований является одной из наиболее сильных сторон рассматриваемой диссертации.

ЗНАЧИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ ДЛЯ РАЗВИТИЯ СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ ОТРАСЛИ НАУКИ определяется научной новизной, теоретической и практической значимостью диссертационной работы.

Научная новизна работы сформулирована в следующих обоснованных автором положениях.

1. Созданы методики измерений с применением уникального оборудования и методов обработки результатов, позволяющие с более высокой точностью проводить исследования и испытания исходных ВТСП лент, а также ТНЭ, кабелей, проводников и различных устройств на их основе.

2. Разработаны новые и усовершенствованы существующие математические модели для оптимизации конструкции компактных коаксиальных и триаксиальных силовых ВТСП кабелей. Показано, что использование разработанных расчётных моделей для конструирования и проведение корректирующей оптимизации в процессе производства позволяет создавать

компактные многополюсные коаксиальные ВТСП кабели с равномерным распределением токов по полюсам.

3. Разработана математическая модель для расчета токонесущей способности многополюсного кабеля постоянного тока на основе ВТСП-2 лент с учетом эффекта продольного магнитного поля. Показано, что при учёте этого эффекта в многополюсном кабеле постоянного тока можно существенно увеличить токонесущую способность и эффективность использования дорогостоящего ВТСП материала.

4. Разработана математическая модель и выполнена оптимизация системы размагничивания с обмотками из ВТСП ТНЭ. Показано, что использование ВТСП ТНЭ в системах размагничивания позволяет в десятки раз снизить массу обмоток.

5. Впервые разработана численная модель для оптимизации ВТСП тоководов, работающих во внешнем магнитном поле.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем.

В результате проведенных исследований созданы методики расчета, стенды для экспериментальных исследований и базовые технологии изготовления новых видов силовых кабелей, токонесущих элементов и комбинированных проводников на основе ВТСП лент второго поколения, которые могут быть использованы для широкого спектра практических применений, как в гражданском, так и в военном секторе промышленности.

ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ определяется комплексным подходом к исследованиям, применением апробированных методик. Расчетные характеристики разработанных проводов и кабелей подтверждены результатами испытаний, в том числе, и в различных установках и изделиях. Данные, полученные из численных моделей, хорошо согласуются с данными, полученными при проведении эксперимента, а также с данными, доступными в литературе.

Материалы, которые легли в основу диссертации, обсуждались на 17-ти международных конференциях, а также на нескольких российских семинарах и совещаниях. Ряд работ автора, опубликованных в ходе подготовки к диссертации, удостоен премии Губернатора Московской области в сфере науки и инноваций для молодых ученых и специалистов за 2015 год за разработку и внедрение инновационных сверхпроводниковых кабелей.

Цикл работ коллектива в ОАО «Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности» (ВНИИКП, г. Москва), включая автора, «Исследование электро- и теплофизических процессов в

сверхпроводниках для электротехнических устройств» удостоен премии имени П.Н. Яблочкова Российской Академии Наук в 2018 г.

РЕАЛИЗАЦИЯ И ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основные результаты диссертации использованы во ВНИИКП при создании:

- самых компактных на настоящий момент силовых кабелей на основе ВТСП-2: коаксиального кабеля с током 3 кА и триаксиального кабеля с токами до 4 кА на фазу, в том числе для использования в авиационной технике и кораблестроении;
- оптимизированных ВТСП кабелей постоянного тока, обладающих повышенной пропускной способностью и меньшими потерями по сравнению с ВТСП кабелями переменного тока;
- ВТСП тоководов, работающих во внешнем магнитном поле, которые успешно используются в составе уникального экспериментального стенда для магнитогидродинамического генератора и тепловых испытаний в АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»;
- ВТСП проводов специального назначения с использованием волокнистой и пленочной изоляции, мелкосерийное производство которых организовано впервые в России, и введены Технические Условия на их изготовление. Разработанные провода включены в перечень перспективных изделий военного назначения и отвечают требованиям действующих нормативных документов при создании образцов аппаратуры ВВСТ различного назначения;
- методик испытаний исходных ВТСП-2 лент и изделий на их основе, работающих на переменном и постоянном токе.

СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Материал диссертационной работы изложен последовательно и аргументированно на 277 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения, и списка цитируемой литературы, включающего 179 наименований, содержит 141 рисунок, 13 таблиц и одно Приложение.

Во введении обоснована актуальность работы; сформулированы ее цели и задачи, которые надо решить для достижения указанных целей; указаны предмет и объект исследований, научная новизна работы и практическая значимость полученных результатов; сформулированы положения, выносимые на защиту; представлены сведения об апробации результатов и о личном вкладе автора.

В первой главе дан литературный обзор по теме диссертации, приведены виды современных технических ВТСП материалов, рассмотрены перспективные направления применения ВТСП лент второго поколения и особенности токонесущих элементов, потребных для каждого применения, сформулированы задачи настоящего исследования.

Вторая глава посвящена технике эксперимента и методикам испытаний исходных ВТСП

лент, ТНЭ и кабелей. Рабочие характеристики создаваемых изделий во многом определяются свойствами исходных ВТСП лент. ВТСП ленты в процессе изготовления ТНЭ и кабелей подвергаются тепловым и механическим воздействиям, которые могут привести к заметному снижению их критических параметров. Желательно, чтобы критический ток сверхпроводящего изделия был близок к сумме критических токов составляющих его ВТСП лент, то есть исходный материал использовался максимально эффективно. В математических моделях для расчёта электрофизических процессов и оптимизации изделий из ВТСП лент следует использовать характеристики, полученные при входном контроле исходных лент, и при необходимости корректировать конструкцию изделия.

В третьей главе представлены основные разработки в области моделирования, особенности изготовления и результаты экспериментальных исследований силовых компактных коаксиальных и триаксиальных ВТСП-2 кабелей, и коаксиальных ТНЭ работающих на переменном токе.

Глава 4 посвящена исследованию и разработке ВТСП кабелей и ТНЭ постоянного тока коаксиальной конструкции, а также изучению возможности повышения их токонесущей способности за счет эффекта продольного магнитного поля.

В главе 5 излагаются результаты разработки и изготовления ВТСП тоководов, работающих во внешнем магнитном поле, и токонесущих элементов для различного сверхпроводникового оборудования.

В заключении приведены основные результаты и выводы по работе.

ЗАМЕЧАНИЯ по диссертационной работе.

1) Во второй главе описан способ изготовления токовода кабелей коаксиальной конструкции, обеспечивающий одинаковое сопротивление контакта. Отмечено, что распределение токов по повивам при измерениях на переменном токе должно определяться импедансом самого кабеля. Существуют ли ограничения на длину исследуемого образца и величину сопротивления токовода с точки зрения точности измерений?

2) Показано, что в компактном коаксиальном кабеле на основе ВТСП лент второго поколения потери на переменном токе снижены в десятки раз по сравнению с триаксиальным кабелем на основе ВТСП лент первого поколения. Но вот аналогичных исследований или расчётов потерь в триаксиальном кабеле не приведено.

3) В четвертой главе нет обоснования выбора габаритных размеров систем размагничивания, для которых были проведены расчёты.

4) В пятой главе приведено описание разработки ВТСП тоководов, способных работать в магнитном поле до 2 Тл. Но не указано, были ли проведены испытания этих

токовводов в рабочем режиме.

5) По тексту диссертации и автореферата имеются редакционные замечания.

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности представленной работы и не влияют на ее общую положительную оценку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оформление диссертации и автореферата соответствует установленным требованиям. Автореферат достаточно полно отражает основные положения и результаты диссертации.

Диссертация Фетисова Сергея Сергеевича соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» от 24.09.2013 г. № 842 (с изменениями и дополнениями, утвержденными Постановлениями Правительства Российской Федерации № 335 от 21.04.2016, № 1168 от 01.10.2018 г., № 426 от 20.03.2021 г. и № 1539 от 11.09.2021 г.) и является научно-квалификационной работой, в которой в результате выполненных автором исследований решена научная проблема создания нового класса сверхпроводящих кабелей, токонесущих элементов и токовводов на основе высокотемпературных сверхпроводящих лент второго поколения, позволяющих создавать эффективные электротехнические, электрофизические и электроэнергетические устройства на основе явления сверхпроводимости. В работе изложены новые, научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых имеет важное хозяйственное значение и вносит существенный вклад в развитие промышленной и бортовой электроэнергетики.

Диссертационная работа и настоящий отзыв обсуждены и одобрены на заседании кафедры 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (протокол №15 от 20 июня 2022 г.).

Заведующий кафедрой 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы», МАИ
доктор технических наук



К.Л. Ковалев.

Подпись Ковалева К.Л. заверяю

Директор дирекции института №3 МАИ



Ю.Г. Следков

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Адрес: Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП 3, г. Москва, 125993

Тел.: +7 499 158-43-33, сайт: www.mai.ru, эл. почта: yurav@mai.ru, mai@mai.ru