

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Новикова Михаила Станиславовича

«Разработка, изготовление и исследования сильноточных токонесущих элементов из ВТСП лент 2-го поколения»

на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

Диссертация Новикова М.С. посвящена разработкам и исследованиям в области создания сильноточных токонесущих элементов из ВТСП 2-го поколения. Задача создания токонесущих элементов с рабочими токами, значительно превышающими критический ток единичной ВТСП ленты, достаточно сложна и актуальна. С этой целью необходимо объединить множество ВТСП лент в сильноточный токонесущий элемент (ТНЭ). Первый тип токонесущего элемента, рассматриваемый в работе – это ТНЭ из нескольких параллельных ВТСП лент, которыми наматываются модули токоограничителей короткого замыкания (резистивного типа). Другая важная часть работы посвящена гораздо более универсальному ТНЭ, геликоидального типа, который может применяться для передачи тока, и для создания магнитного поля.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 181 страница, включая 98 рисунков, 21 таблицу и список литературы из 77 наименований.

Введение в диссертацию включает краткую постановку задач, и обоснование новизны и практической ценности работы, ее актуальности. В первой главе выполнен обзор литературных данных по современным ВТСП лентам 2-го поколения, ТНЭ из них, перспективным сильноточным магнитным системам и устройствам из ВТСП. В том числе описаны различные реализации сверхпроводниковых ограничителей тока (СОТ) короткого замыкания – несколько конструкций резистивного типа, СОТ индуктивного типа. Описаны технологии изготовления и схемы подключения резистивных СОТ. Конструкции сильноточных ТНЭ для магнитов – ребель, стек и CORCC – сравниваются между собой.

Во второй главе описано создание модулей СОТ из 2 параллельных ВТСП лент и прототипа токоограничителя, собранного из восьми последовательно соединенных модулей. В первом разделе поставлены задачи по разработке токоограничителей и обозначены основные проблемы (обеспечение однородного распределения токов, проблема «горячих пятен», краевые эффекты собственного поля тока). Далее описаны исследования свойств ВТСП лент, методика численного моделирования тепловых процессов в режиме короткого замыкания, позволяющая рассчитывать конструкцию СОТ, и методика изготовления модулей СОТ. Описан СОТ на 3,5 кВ, методики его испытаний, достигнутый положительный результат испытаний. Предложено и экспериментально подтверждено применение дополнительной резистивной ленты для решения проблемы «горячих пятен». Подчеркнута необходимость и целесообразность отключения СОТ или

переключения на байпас при коротком замыкании, при помощи быстродействующих выключателей. Созданные модули и прототип СОТ по результатам показали свою работоспособность, их ожидаемые параметры хорошо согласуются с результатами проведенных расчетов.

В третьей главе описана разработка ТНЭ для СОТ с номинальным током 900 А, напряжением 27,5 кВ действующего значения. Эскизный проект такого токоограничителя подразумевал использование до 6 параллельных ВТСП лент. Описано изготовление, а также экспериментальные и расчетные исследования образцов ТНЭ. Решены две основные задачи. Во-первых, исследовано распределение тока между лентами ТНЭ, которое оказалось равномерным при больших токах, так что токонесущая способность ТНЭ определяется характеристиками одиночной ленты. Во-вторых, во избежание снижения токонесущей способности и возникновения потерь из-за особенностей распределения поля собственного тока на краях бифилярных обмоток СОТ, предложено шунтировать крайний виток дополнительной ВТСП лентой. Эксперимент показал эффективность подобной меры – токонесущая способность ТНЭ из 3 лент увеличилась на 100 А действующего значения тока.

В четвертой главе приведено описание разработки конструкций, изготовления и исследований образцов гибких сильноточных ТНЭ с диаметром сечения несколько миллиметров. Поставлена задача освоить конструкцию ТНЭ для перспективных крупных и импульсных магнитных систем и мощных электроэнергетических устройств постоянного тока. Проанализировав основные требования к гибкому сильноточному токонесущему элементу, автор делает вывод, что ТНЭ должен сочетать высокую токонесущую способность, низкие потери, высокую тепловую и механическую устойчивость. Способ изготовления ТНЭ не должен требовать сложного и дорогостоящего оборудования. Автор описывает методики исследования ВТСП лент и ТНЭ, исследования лент, на основе которых выработаны требования к ВТСП лентам для ТНЭ, и выбор конструкций лент. Исследования первых изготовленных образцов, подтвердили пригодность данной конструкции ТНЭ, и позволили создать технологию изготовления, пригодную для промышленного производства.

В пятой главе приводятся рекомендации по применению геликоидального ТНЭ и описан способ изготовления длинномерных кусков и экспериментальное намоточное устройство для их изготовления. Также рассматриваются возможные перспективные применения: магниты термоядерных устройств, мощные плазменные двигатели, магниты для экранировки космических аппаратов от заряженных частиц, индуктивный накопитель энергии, и гибкий токоподвод с проточным охлаждением. Описана методика численного моделирования тепловых и электродинамических процессов в ТНЭ при тепловых возмущениях. Приведены результаты расчетных оценок критических энергий тепловых возмущений с учетом различных конструкций токонесущих элементов и разнообразных условий охлаждения.

В заключении по результатам работы сделаны выводы:

В ходе работы разработаны конструкции, изготовлены и исследованы образцы ТНЭ, модули и макет СОТ. Проведенные исследования и разработки позволят

изготавливать ряд промышленных СОТ с требуемыми в электросетях параметрами. Разработана технология изготовления модулей СОТ и автоматизированное экспериментальное намоточное устройство.

Разработаны конструкция и технология изготовления высокоточных геликоидальных токонесящих элементов для применения в магнитных системах и электроэнергетических устройствах. Создано экспериментальное устройство для изготовления длинномерных кусков геликоидального ТНЭ. Проведен комплекс исследований, обосновывающий пригодность конструкции геликоидального ТНЭ для различных перспективных магнитов и устройств.

Разработаны методики численных расчетных оценок, экспериментальных исследований и испытаний ТНЭ из многих ВТСП лент 2-го поколения.

Актуальность тематики диссертации

Разработка СОТ актуальна, поскольку это единственный класс устройств, способный многократно глубоко ограничивать первую полуволну тока КЗ без потерь в номинальном режиме. Для устройств с рабочим током, превышающим критический ток ВТСП ленты, необходимы высокоточные ТНЭ. Возможны применения гибкого геликоидального ТНЭ в различных сверхпроводниковых устройствах: токамаках; плазменных двигателях; системах магнитной экранировки; импульсных накопителях энергии; в магнитных системах ускорителей частиц (высокополевые вставки, гибкие токоподводы); в электромашинных и токоограничителях индуктивного типа. При разработке ТНЭ должны учитываться рабочий ток, потери, минимальный радиус изгиба, механическая и тепловая устойчивость, поэтому необходимы их комплексные исследования. Работа поддерживалась ГК «Росатом» по темам: разработка сверхпроводникового ограничителя тока резистивного типа; разработка гибких токоподводов для ускорительных магнитов и устройств термоядерной энергетики; разработка токонесящего элемента сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии мегаджоульного класса.

Научная новизна работы

Новизна работы состоит в том, что разработаны конструкции, изготовлены и исследованы образцы токонесящих элементов и токоограничителей, разработана технология изготовления высокоточных токонесящих элементов, созданы экспериментальные устройства для изготовления ТНЭ и СОТ, сформулированы рекомендации по изготовлению устройств из высокоточных токонесящих элементов. Созданы методики численного моделирования СОТ и геликоидального ТНЭ.

Практическая значимость работы

Применение результатов диссертации позволит создать различные ВТСП-2 устройства: перспективные высокополевые магниты токамаков, ускорителей частиц, крупных научно-исследовательских и промышленных систем; импульсные ВТСП магниты индуктивных накопителей энергии; крупные бортовые магнитные системы, в том числе для космоса,

авиации и флота. Из устройств электроэнергетики результаты диссертации будут полезны при разработке токоограничителей резистивного, а также индуктивного типов и гибких компактных кабелей постоянного тока.

Разработка и внедрение перечисленных устройств возможна в следующих организациях: НИЦ "Курчатовский институт", Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации, АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», Объединенный институт высоких температур РАН, Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, РКК «Энергия», ОАО «Конструкторское бюро химавтоматики», ФГУП ЦНИИмаш, Московский авиационный институт, ПАО «Россети», ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», Объединенный институт ядерных исследований, других предприятиях ГК «Росатом» и ГК «Роскосмос» и т.д.

Апробация работы

Работа представлена на российских и международных конференциях, семинарах и совещаниях по сверхпроводимости, а также на двух российских конференциях по возможным областям применения результатов (термоядерные устройства и дальний космос). Соответствующие ссылки приведены в диссертации.

Публикации по теме диссертации

Результаты работы опубликованы в 10 статьях, 6 из которых – в рецензируемых изданиях.

В большинстве работ Новиков М.С. был ответственным автором.

В диссертационной работе решены поставленные задачи и предложены решения некоторых важных научно-технических проблем. Получены актуальные и практически значимые результаты. Работа выполнена на хорошем научно-техническом уровне.

Работа в целом выполнена качественно, есть реальные результаты, которые могут быть практически использованы. Но к некоторым частям работы есть замечания:

1. Времена отключения при расчёте токоограничителей, приведённые в работе, составляют десятки миллисекунд. В то время как сейчас доступны быстродействующие выключатели с гораздо меньшим временем срабатывания, и они могли бы существенно улучшить цену СОТ, за счет меньшего расхода ВТСП ленты, или уменьшить время восстановления, или и то и другое. Следовало бы это рассмотреть.

2. Хотелось бы увидеть численный расчет распределения тока и потерь на переменном токе в СОТ. Хотя приведены результаты экспериментальных исследований, которые показывают приемлемость такой конструкции ТНЭ для переменного тока, расчетная методика явно не помешала бы, а серьезно дополнила работу.

3. При расчете теплопередачи от нагретого ВТСП элемента автор пренебрегает передачей тепла жидкому азоту его теплопроводностью, хотя при импульсном нагреве передача тепла в начале процесса полностью определяется теплопроводностью, поскольку для развития пузырькового кипения на поверхности ленты требуется, хотя и малое, но конечное время (см. I.N. Dul'kin, и др. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 18, 7, -2008).

Приведённые замечания не влияют на общий вывод о диссертации. Она представляет законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Новиков М.С. заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки. Работа М.С. Новикова заслушана на семинаре НПО-22 Научно-исследовательского института технической физики и автоматизации АО «НИИТФА» и получила одобрение.

Отзыв составил доктор физико-математических наук, профессор, директор НПО «СОТ» 22 Научно-исследовательского института технической физики и автоматизации АО «НИИТФА»

Л. М. Фишер

115230, г. Москва, Варшавское шоссе, д.46, (495) 730-80-10, lmfisher@niitfa.ru

Заместитель директора по науке и
производству АО «НИИТФА»



Е. В. Скачков

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации», 115230, г. Москва, Варшавское шоссе, д.46, (495) 730-80-10,

e-mail dep17@niitfa.ru