



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

29.10.2015 № 04-26/706

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

Акционерного Общества «НИИЭФА

им. Д.В. Ефремова», д.ф.-м.н.

О. Г. Филатов



» \_\_\_\_\_ 2015 г.

### Отзыв ведущей организации

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

на диссертацию Новикова Михаила Станиславовича

«Разработка, изготовление и исследования сильноточных токонесущих элементов из ВТСП лент 2-го поколения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13. –

Электрофизика, электрофизические установки

### Актуальность темы диссертации

Применение высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в магнитных системах и электроэнергетических устройствах, относится к числу критических технологий, направленных на создание установок индустриальной физики, транспортных (включая космические) систем, термоядерной и обычной энергетики, принципиально новых научно-

исследовательских, медицинских и промышленных устройств. Во всех ведущих в технологическом отношении странах мира ведутся активные исследования в этой сфере, сочетающие разработку как ВТСП проводов (лент), так и высокоточных токонесущих элементов на их основе, самих ВТСП устройств и систем поддержания рабочей температуры. Для крупных магнитных систем – устройств термоядерного синтеза, ускорителей частиц, безэлектродных плазменных двигателей, магнитной защиты космических аппаратов – необходимы высокоточные токонесущие элементы (ТНЭ) для получения высоких магнитных полей в большом объеме, или для работы в диапазоне температур выше жидкого гелия, или для того и другого одновременно. Также высокоточные ТНЭ необходимы для импульсных магнитов, таких, как бортовые накопители энергии и обмотки электромашин и МГД генераторов. Токонесущие элементы для вышеперечисленных магнитов должны сочетать высокую токонесущую способность, механическую и тепловую стабильность, низкий уровень диссипации энергии в переменных режимах, удобство и технологичность изготовления и применения. Кроме того, в научно-исследовательских установках, в промышленности и энергетике, на флоте существует потребность в гибких компактных токопроводах для передачи больших постоянных токов при температурах от 20 до 77 К. Для ограничения токов короткого замыкания в распределительных сетях целесообразно применять сверхпроводниковые ограничители тока (СОТ) резистивного типа. Это, пожалуй, единственный класс устройств, способный обеспечить многократное глубокое токоограничение на первой полуволне без потерь в рабочем режиме. В большинстве случаев рабочий ток СОТ значительно превышает максимальный ток единичного ВТСП провода, что требует изготовления их модулей из нескольких параллельных лент. С учетом вышеизложенного тематика диссертационной работы М.С. Новикова – создание высокоточных токонесущих элементов геликоидального типа и высокоточных модулей СОТ, является, несомненно, актуальной как с научной, так и практической точки зрения.

## **Основные результаты диссертации и их новизна**

1. Разработка, изготовление и проведение комплекса исследований токонесущих элементов СОТ из двух, трех и шести параллельных ВТСП лент, модулей СОТ на 250 А/380 В, СОТ на 250 А/3,5 кВ из 8 модулей, коаксиальных образцов ТНЭ для СОТ на 900 А. Полученные результаты обладают новизной и обеспечивают разработку по требованиям распределительных сетей резистивных СОТ на различные рабочие токи и напряжения.

2. Разработка и изготовление автоматизированного устройства для намотки модулей СОТ из нескольких параллельных ВТСП лент. Обладающее новизной устройство – прототип промышленных устройств для автоматизированного изготовления СОТ. В перспективе, аналогичные устройства позволят создать промышленную технологию намотки модулей СОТ.

3. Разработка конструкций, изготовление и комплексные исследования образцов геликоидального сильноточного ТНЭ, состоящего из большого количества ВТСП лент, намотанных по спирали на круглые стальные или полые медные формеры. Впервые полученные результаты позволят приступить к применению геликоидального ВТСП ТНЭ в магнитах термоядерного источника нейтронов, плазменных электрореактивных двигателей, в импульсных магнитных системах, гибких токоподводах с проточным охлаждением и других устройствах. В работе сформулированы конкретные рекомендации к применению геликоидального ТНЭ.

4. Разработка, создание и успешные испытания экспериментального устройства и технологии для изготовления длинномерных кусков геликоидального ТНЭ. Описанное экспериментальное устройство - первое в России и второе в мире специализированное автоматизированное оборудование для производства геликоидального ВТСП ТНЭ – предлагается в качестве прототипа промышленных устройств. На базе него, в настоящее время, отрабатываются промышленные технологии изготовления, и изготавливаются длинномерные образцы в поддержку конструкций геликоидального ТНЭ для различных применений.

## **Публикации и апробация**

Результаты разработок и исследований, изложенных в диссертации, опубликованы в 10 работах, 6 из которых – в рецензируемых изданиях.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах и конференциях, перечисленных ниже:

- «European Conference on Applied Superconductivity» EUCAS-2011, 18-23 сентября 2011 г., Гаага, Нидерланды
- «Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости» НКПС-2011, 6-8 декабря 2011 г. Москва
- семинары НИЦ «КИ» по прикладной сверхпроводимости,
- рабочее совещание «Технология ВТСП-2 проводников и их применение в устройствах электроэнергетики», 23-24 мая 2012 г, Москва.
- «Applied Superconductivity Conference» ASC2012, 7-12 октября 2012 г., Портленд, Орегон, США
- «Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости» НКПС- 2013 26–28 ноября 2013 г. Москва
- «Материалы ядерной техники» МАЯТ2014, 7-9 октября 2014 г. Звенигород
- научно-практическая конференция “Технология ВТСП-2 проводников и их применение в устройствах электроэнергетики”, г. Москва, 30-31 октября 2014 г.
- XII Всероссийская научно-техническая конференция «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского», г. Москва 16-17 апреля 2015 г.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность результатов подтверждается хорошей повторяемостью экспериментальных результатов и согласованностью результатов исследований ТНЭ и единичных ВТСП лент. Экспериментальные данные подтверждают результаты анализа и расчетов. В частности, методики расчета тепловых процессов показывают удовлетворительную для практических целей точность при моделировании экспериментов. Дополнительным фактором, позволяющим оценить достоверность

полученных результатов, является использование апробированных ранее методик экспериментального исследования ТНЭ и единичных лент, а также аппарата для численных и аналитических расчетов.

### **Практическая значимость**

Применение разработанных конструкций ТНЭ и автоматизированных устройств для изготовления ТНЭ позволит создать сильноточные ВТСП-2 устройства различного назначения.

Результаты работы могут быть полезны при разработке:

- перспективных высокополевых ВТСП магнитов токамаков, ускорителей частиц, крупных научно-исследовательских и промышленных систем;

- импульсных ВТСП магнитов бортовых и портативных индуктивных накопителей энергии

- крупных бортовых и портативных магнитных систем, в том числе для космического применения и для флота – можно выделить магниты безэлектродных плазменных двигателей, магнитную защиту космических аппаратов, обмотки электрогенераторов и электродвигателей, высокополевые магниты МГД генераторов для применения в составе космических ядерных энергодвигательных установок и для питания бортовых импульсных нагрузок, для МГД движителей;

- токоограничителей резистивного, а также индуктивного типов;

- гибких компактных токоподводов постоянного тока для промышленности и установок индустриальной физики.

Разработка перечисленных устройств с применением описанных сильноточных ВТСП ТНЭ может вестись, в частности, в следующих организациях: НИЦ "Курчатовский институт", 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, входящие в состав ГК «Росатом» и ГК «Роскосмос» и т.п.

## Содержание работы

Работа состоит из введения, литературного обзора, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 181 страницу, включая 98 рисунков, 21 таблицу и список цитируемой литературы из 77 наименований.

Во введении и главе 1 (литературном обзоре) обоснована актуальность темы, сформулированы цели исследования, научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Описаны современные ВТСП провода 2 поколения (SuperPower, SuNAM, THEVA), основные их характеристики, методики исследования. Описаны способы получения высоких рабочих токов в ВТСП устройствах – параллельная намотка, намотка стопкой лент, ребель – полностью транспонированный ТНЭ из стрэндов сложной формы, вырезанных из широких ВТСП лент, твистированная стопка лент, геликоидальный элемент – аналогичный CORCC (Conductor on Round Core Cable). Проведено сравнение разных конструкций ТНЭ между собой. Рассмотрен вопрос дальнейшего агрегатирования базовых ТНЭ.

Обоснован выбор конструкций изготавливаемых и исследуемых ТНЭ (геликоидальный ТНЭ для импульсных магнитов и гибких кабелей, параллельная и параллельно-стековая намотка для резистивных СОТ).

Рассмотрены работы по перспективному применению сильноточных токонесящих элементов для токамаков и ускорителей частиц.

Проанализированы перспективы применения CORCC в качестве компактных гибких силовых кабелей постоянного тока и работы, ведущиеся в этом направлении.

Рассмотрены некоторые классы перспективных магнитных систем и устройств из ВТСП, в которых могут быть использованы сильноточные токонесящие элементы, например, системы космического применения.

Глава 2 посвящена разработке ТНЭ для сверхпроводниковых ограничителей тока (СОТ) резистивного типа и прототипа СОТ на их основе.

В главе 3 описаны разработка и исследование ТНЭ для проектируемого прототипа СОТ на 900 А 27,5 кВ.

Глава 4 посвящена разработке конструкций, созданию и исследованию образцов гибких сильноточных геликоидальных ТНЭ малого диаметра, исследованиям и выбору ВТСП лент для них.

В главе 5 описаны рекомендации по производству и применению гибкого геликоидального сильноточного ТНЭ. Рассмотрены следующие перспективные применения геликоидального ТНЭ:

1) Тороидальный магнит термоядерного источника нейтронов.

2) Магнитная система межорбитального плазменного двигателя мощностью 1-200 МВт.

3) Магнитные системы для экранирования космических аппаратов от заряженных частиц и для создания искусственной магнитосферы на планетарных базах.

4) Гибкие токоподводы с проточным охлаждением для устройств ускорительной техники.

5) Прототип СПИН мегаваттного класса.

Наконец, в заключении перечислены основные результаты и выводы работы:

1. Подготовлены научно обоснованные рекомендации для конструкций сильноточных ВТСП-2 ТНЭ, оптимизированных для конкретных применений в магнитных системах и электроэнергетических устройствах различного назначения.

2. Разработан способ изготовления длиномерных (100 и более метров) кусков сильноточного геликоидального ТНЭ с рабочими токами до 100 кА и создано соответствующее экспериментальное устройство, и опытное производство.

3. Разработаны конструкции и изготовлены образцы сильноточного геликоидального ТНЭ, позволяющие существенно улучшить параметры магнитных систем перспективных токамаков и других крупных магнитов, а также дающие возможность создания высокоэффективных магнитных систем для плазменных двигателей мощностью 1-200 МВт, импульсных СПИН, различных электроэнергетических устройств и ВТСП токоподводов с рабочими токами в десятки кА. Проведенные исследования образцов геликоидального ТНЭ показали возможности применения данного типа ТНЭ для использования в вышеперечисленных перспективных устройствах.

4. Разработаны конструкции сильноточных ТНЭ с рабочими токами до 900 А, токоограничивающих модулей и резистивных СОТ на напряжение до 27,5 кВ, создано экспериментальное устройство для их изготовления.

5. Проведенные исследования и разработки резистивных СОТ позволят создать ряд промышленных устройств с различными требуемыми параметрами ограничения тока короткого замыкания для распределительных электросетей (рабочие токи 0,25-2 кА, напряжения до 35 кВ, время восстановления 1-5 с).

### **Замечания**

Положительно характеризуя работу М. С. Новикова, можно высказать, однако, и некоторые замечания:

1. Литературный обзор содержит недостаточно информации, непосредственно связанной с разработкой сильноточных ТНЭ. Приведенные описания устройств на их основе часто не имеют непосредственного отношения к теме диссертационной работы.
2. Вопросы устойчивости разработанных ТНЭ к механическим напряжениям, возникающих в магнитных системах различного назначения, требуют более подробного рассмотрения. В ряде случаев напряженно-деформированное состояние ТНЭ может свести на нет преимущества, заявленные в диссертации.
3. В работе не приведены экспериментальные и расчетные исследования распределения токов между ВТСП лентами в геликоидальном ТНЭ и модулях СОТ для различных режимов, в том числе на переменном токе.

Резюмируя, можно отметить уклон в сторону практической реализации заявленных принципов построения ТНЭ и устройств. Теоретическое обоснование принятых технических решений отражено с меньшей полнотой.

### **Заключение**

Диссертационная работа Новикова М.С. "Разработка, изготовление и исследования сильноточных токонесущих элементов из ВТСП лент 2-го поколения" представляет собой законченное научное исследование, выполненное по актуальной тематике на высоком экспериментальном и теоретическом уровне. Достоверность результатов обеспечена использованием апробированных методик, обеспечивающих согласованность экспериментальных и расчетных результатов. Приведенные



выше замечания имеют непринципиальный характер и не влияют на общую положительную оценку работы. Разработанные автором сильноточные токонесущие элементы из ВТСП 2-го поколения представляют практический и научный интерес. Автореферат и публикации в полной мере отражают содержание диссертации, выводы и заключения обоснованы. Работа отвечает всем требованиям ВАК, включая п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации № 842 в редакции от 24.09.2013 года, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор – Новиков Михаил Станиславович достоин присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании научно-технического совета НТЦ «Синтез» АО «НИИЭФА», протокол № 8 от 21 октября 2015 г.

Присутствовало на заседании 22 чел. Результаты голосования: «за» - 22 чел., «против» - нет, «воздержались» - нет.

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



Беляков В.А.

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



Люблин Б.В.

Начальник научно-исследовательского  
отдела сверхпроводящих магнитных систем,  
кандидат физико-математических наук



Родин И.Ю.