

## **ОТЗЫВ**

### **официального оппонента**

**на диссертационную работу Новикова Михаила Станиславовича  
«Разработка, изготовление и исследования сильноточных токонесущих  
элементов из ВТСП лент 2-го поколения» представленной на соискание  
ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 –  
электрофизика, электрофизические установки**

Ряд перспективных сверхпроводящих магнитов и устройств на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) должен иметь рабочий ток во много раз больший, чем у единичных ВТСП лент. При создании таких устройств важнейшей задачей является способ объединения множества ВТСП лент в сильноточные токонесущие элементы (ТНЭ) различных конструкций, разработанных под конкретные типы устройств. Токонесущие элементы для этих устройств должны сочетать высокий рабочий ток, низкие потери, достаточно малый допустимый радиус изгиба, механическую и тепловую устойчивость. Такими устройствами могут быть: магнитные системы нового поколения токамаков, плазменные двигатели; системы магнитной радиационной защиты; импульсные магниты; магнитные системы ускорителей частиц (высокополевые вставки, гибкие токоподводы); электромшины; сверхпроводящие ограничители тока (СОТ) короткого замыкания индуктивного типа. ТНЭ с высокими токами и с определенными свойствами необходимы так же и для СОТ резистивного типа.

Поэтому диссертация Новикова М.С. посвященная разработкам и исследованиям сильноточных токонесущих элементов на основе высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент 2-го поколения несомненно актуальна, своевременна и находится в тренде мировых исследования и разработок крупномасштабных сверхпроводящих устройств.

Логически, диссертация состоит из двух крупных частей. В первой части исследуются ТНЭ для СОТ короткого замыкания резистивного типа. Вторая часть исследования посвящена разработке конструкций, созданию и

исследованию гибких сильноточных токонесущих элементов из многих ВТСП лент, намотанных в несколько слоев по спирали на формеры (держатели) с круглым сечением. Это, так называемые, геликоидальные токонесущие элементы.

Во введении, как и полагается, автор обосновал актуальность темы, обосновал новизну и перспективы практического применения разработок, сформулировал цели и задачи работы.

В первой главе проводится очень полный и объемный обзор литературы не только по конкретной теме диссертации, но и по применениям ВТСП ТНЭ в различных устройствах. Рассмотрены ВТСП ленты 2-го поколения, различные типы токонесущих элементов из них, и перспективны их использования в сильноточных магнитных системах. Приведено сравнение свойств различных токонесущих элементов. Автор обосновывает преимущество конструкции геликоидального токонесущего элемента для ряда применений, которое заключается в универсальности и удачном сочетании свойств. Автор показал прекрасное владение темой, хотя там и встречаются мелкие несущественные недочеты.

Вторая глава посвящена разработке модулей токоограничителей, и токоограничителя из 8 последовательно соединенных модулей. Описаны основные проблемы при разработке токоограничителей (проблема «горячих пятен» и распределение тока между отдельными лентами). Описаны экспериментальные и численные исследования ВТСП лент модулей токоограничителя, и 8-модульного устройства. Предложена методика расчета токоограничителей, конструкция модулей, технология намотки, методики испытаний, решения вышеупомянутых проблем при разработке. Технология намотки модулей реализована в виде экспериментального автоматизированного намоточного устройства. Все изготовленные устройства, технические решения и численные методики успешно прошли экспериментальную проверку.

Третья глава посвящена разработке токонесущего элемента из 6 параллельных ВТСП лент для проекта токоограничителя с номинальным током 900 А и напряжением 27,5 кВ действующего значения. Для этого были изготовлены и исследованы экспериментально и численно образцы токонесущих элементов. С помощью массива датчиков Холла исследовано распределение тока между лентами, оно практически равномерно при токах, близких к максимальным рабочим. Численно промоделировано распределение собственного поля, по результатам предложено усиление токонесущего элемента на краях бифилярных обмоток, устраняющее влияние пиков поля собственного тока. Применено шунтирование крайней ленты крайнего витка дополнительной ВТСП лентой, эффективность этого решения подтверждена экспериментально.

Сильной стороной обоих этих разделов является хороший расчетный анализ работы различных типов СОТ и ТНЭ для СОТ. Радует, что автор понимает разницу между распространением истинной нормальной зоны и распространением резистивной зоны в высокотемпературных сверхпроводниках при азотных температурах и грамотно применяет это понимание в расчетах. Такое понимание нечасто встречается в современных исследованиях, где авторы применяют термин «нормальная зона» к резистивному состоянию высокотемпературного сверхпроводника.

В четвертой главе автор описывает разработку конструкций, создание и исследования образцов гибких сильноточных токонесущих элементов из многих ВТСП лент, намотанных в несколько слоев по спирали на формеры с круглым сечением. Токонесущие элементы необходимы в основном для перспективных крупных и импульсных магнитных систем, электроэнергетических устройств, и в некоторых случаях для передачи больших постоянных токов на короткие расстояния. Он должен сочетать высокие рабочие токи, низкие потери, тепловую стабильность и механическую устойчивость, его изготовление и применение должно быть технологически простым. В главе описаны методики исследования ВТСП

лент и токонесущих элементов, сами эти исследования, выбор конструкций лент и разработка конструкций образцов токонесущих элементов. Первые образцы изготовлены на экспериментальном автоматизированном устройстве для изготовления коротких образцов, по принципам, определяющим технологию изготовления – это независимое натяжение всех ВТСП лент двигателями, а также жестко программно заданный шаг обкрутки формера лентами. Исследования первых образцов подтвердили принципиальную пригодность данной конструкции токонесущего элемента для магнитов, и помогли разработать способ изготовления длинномерных кусков.

Здесь сильной стороной является практический подход к изготовлению геликоидальных ТНЭ и создание лабораторного устройства для изготовления таких ТНЭ.

В пятой главе рассказывается о потенциальных возможностях и имеющихся наработках по производству геликоидального токонесущего элемента, и созданию из него магнитных систем и токоподводов. Рассматриваются такие применения, как токамаки, мощные плазменные двигатели, экранировка космических аппаратов от заряженных частиц, индуктивные накопители, и гибкие токоподводы с проточным охлаждением. Кратко упомянуты и другие возможные применения, в основном в крупных или импульсных магнитах электроэнергетических устройств и установок индустриальной физики. Описана технология изготовления длинномерных кусков геликоидальных токонесущих элементов, воплощенная в экспериментальном намоточном устройстве. Устройство создано в ходе работы при непосредственном активном участии автора, и проверено экспериментально – успешно изготовлен и испытан 10 м образец. Кроме того, в главе приведены рекомендации разработчикам ВТСП лент для геликоидального токонесущего элемента, и расчет геометрии токонесущего элемента из лент некоторых существующих конструкций.

Важно, что в главах 4 и 5 описана разработанная автором методика численного моделирования термодинамических и электродинамических

процессов в токонесущих элементах. Методика позволяет учитывать охлаждение, реальную вольтамперную характеристику пространственные и временные зависимости этих параметров, а также тепловых возмущений. Приведены результаты расчетов критических энергий тепловых возмущений для различных конструкций токонесущих элементов в разнообразных условиях охлаждения и при различной локализации и протяженности возмущений. Методика прошла экспериментальную проверку при моделировании экспериментальных исследований действия на токонесущий элемент тепловых возмущений импульсами тока. Это так же является несомненным достоинством анализируемой работы.

В заключении, кратко изложены основные результаты работы. Причем результаты актуальные, новые и имеющие важное практическое значение. Про актуальность работы сказано выше.

Новизна работы в том, что впервые в России разработаны, изготовлены и исследованы новые конструкции, сверхпроводящих ТНЭ, разработана технология изготовления высокоточных токонесущих элементов, сформулированы рекомендации по изготовлению устройств из высокоточных токонесущих элементов. Созданы методики численного моделирования тепловых процессов в токонесущих элементах.

Практическая значимость работы очевидна, поскольку все исследования и разработки направлены на решение практических задач по созданию перспективных крупномасштабных сверхпроводящих устройств на основе ВТСП второго поколения.

Личный вклад автора работы известен научному сообществу. Все основные результаты диссертации получены либо полностью автором, либо при его непосредственном участии.

Представленный автореферат диссертации соответствует.

По диссертации имеются следующие замечания.

1. Не отрицая остроумность и хороший уровень разработанного и изготовленного устройства для изготовления геликоидального ТНЭ, автору следовало бы рассмотреть возможность создания устройства для изготовления геликоидального токонесущего элемента на основе промышленного кабельного оборудования. Адаптация и доработка такого оборудования потребовала бы гораздо меньше труда, чем разработка отдельного класса машин.

2. Хотелось бы видеть более подробный анализ механической деформации ВТСП слоя при изготовлении геликоидального токонесущего элемента, и ее влияния на токонесущую способность.

3. Численный анализ распределения переменного и импульсного тока в геликоидальных токонесущих элементах, и в токоограничителях очень бы дополнил и украсил работу. Хотя для геликоидальных токонесущих элементов применения на переменном токе пока не рассматриваются, все же потери в переменных режимах важны, а они сильно зависят от процессов перераспределения тока.

Указанные недостатки не снижают в целом высокий уровень работы. Приведенные замечания скорее являются рекомендациями и пожеланиями по дальнейшей работе в данном направлении.

Автор в данной работе достиг поставленных целей, получил новые и полезные результаты, проявил высокую квалификацию исследователя и разработчика. Исходя из сказанного выше, считаю, что диссертация Новикова М.С. *«Разработка, изготовление и исследования сильноточных токонесущих элементов из ВТСП лент 2-го поколения»* представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Новиков М.С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Отзыв составил доктор технических наук, Директор научного направления – заведующий Отделением сверхпроводящих проводов и кабелей Всероссийского научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института кабельной промышленности:



ВЫСОЦКИЙ В.С.

111024, г. Москва, шоссе Энтузиастов, дом 5, (499)-670-96-05, (985)-766-26-34; vysotsky@ieee.org

Подпись В.С. Высоцкого удостоверяю  
Ученый секретарь секции Сверхпроводящие Провода и Кабели  
Научно Технического Совета ОАО «ВНИИКП»,  
ведущий научный сотрудник



ПОТАНИНА Л.В.

Открытое акционерное общество Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности Москва, 111024, Шоссе Энтузиастов д. 5, (495) 678-0216, e-mail: vniikp@vniikp.ru