

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента Курбатова Павла Александровича, доктора технических наук, профессора, на диссертацию Фетисова Сергея Сергеевича по теме: «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 исследования**

Прогресс в технологиях и производстве современных высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалов позволяет начать широкое внедрение сверхпроводящих устройств на их основе в электротехнику, электроэнергетику и электрофизические установки. Сверхпроводниковые устройства будут определять дальнейшее развитие широкого ряда промышленных отраслей. Очень важным является использование новых ВТСП материалов для создания перспективных источников энергии на основе управляемого термоядерного синтеза.

Из-за технологических особенностей изготовления высокотемпературных сверхпроводников они выпускаются в виде тонких протяжённых лент с выраженной анизотропией. При этом рабочие токи сверхпроводимости базовых лент не превышают 100-200 А, тогда как большинство применений требуют токов порядков тысяч ампер, вплоть до сотен тысяч ампер. Основная задача, решаемая Фетисовым С.С. в рассматриваемой диссертационной работе, сформулирована как поиск и обоснование оптимальных способов комбинирования ВТСП лент второго поколения для создания сверхпроводящих кабелей, токонесущих элементов (ТНЭ) и других устройств с большими токами. Поставленная задача является несомненно своевременной и актуальной.

Тема диссертации по совокупности формальных признаков соответствует направлению Н2 Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утверждённой Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», что также непосредственно подтверждает факт актуальности работы.



## **Оценка структуры и содержания работы.**

Структура диссертационной работы соответствует содержанию исследований и включает введение, пять глав, заключение, список использованной литературы и одно приложение.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели и задачи, которые необходимо 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 Главе 1 дан обзор публикаций по теме диссертации, приведены основные типы современных технических ВТСП материалов, рассмотрены перспективные направления применения ВТСП материалов второго поколения и особенности токонесущих элементов для этих применений, сформулированы конкретные задачи настоящего исследования.

Глава 2 посвящена технике эксперимента и методикам испытаний исходных ВТСП лент, ТНЭ и кабелей. Автор продемонстрировал прекрасное владение современной экспериментальной техникой, предложил и реализовал несколько нетривиальных экспериментальных методик, позволивших получить уникальные результаты, в частности, при измерениях потерь в ВТСП устройствах на переменном токе. Достоверность полученных экспериментальных данных не вызывают сомнений.

Глава 3 посвящена моделированию процессов при протекании тока, особенностям изготовления и результатам экспериментальных исследований силовых компактных коаксиальных и триаксиальных ВТСП-2 кабелей, и коаксиальных ТНЭ, работающих на переменном токе. Основное внимание уделено проблемам создания особо компактных коаксиальных силовых ВТСП кабелей. На основе полученных результатов исследований была изготовлена и испытана фаза компактного ВТСП кабеля с наружным диаметром 15 мм. На сегодняшний день это наиболее компактный силовой кабель в мире.

Важным результатом является разработка и успешные испытания триаксиального кабеля с повышенной токонесущей способностью, имеющего по два



повива (слоя) на фазу.

В главе 4 выполнен анализ эффекта продольного магнитного поля, при котором оказывается возможным увеличить рабочий ток сверхпроводника в слабом продольном магнитном поле. Автором подробно исследована анизотропия критического тока в базовых ВТСП лентах, рассчитаны и изготовлены модельные кабели, испытания которых показали, что этот эффект действительно имеет место и позволяет поднять рабочий ток кабеля постоянного тока. Рассмотрена возможность использования полученных данных при создании реального устройства – системы стационарного размагничивания крупных объектов (кораблей). Создана малая модель такого устройства и проведены испытания, которые подтвердили возможность создания сверхпроводящей системы размагничивания, которая может быть в десятки раз легче системы размагничивания из обычных медных обмоток.

Глава 5 посвящена созданию и использованию различных токонесущих элементов на основе ВТСП. Приведены результаты разработки токовых вводов для питания сверхпроводящих магнитов, способных работать в магнитном поле до 2 Тл, что отличает их от обычных ВТСП токовводов работающих в слабых рассеянных полях.

Предложено, обосновано и испытано оригинальное конструктивное решение для создания обмоток сверхпроводящего трансформатора на 1 МВА, обеспечивающее равномерное распределение переменных токов в обмотке низкого напряжения с рабочим током порядка 1500 А. Параллельная укладка лент на замкнутую поверхность обеспечивает нахождение всех лент в одинаковых условиях, за счет чего достигается равномерное распределение токов по лентам. Это было подтверждено модельными экспериментами и использовано в реальной обмотке мощного ВТСП трансформатора.

В заключении приведены основные выводы по работе, в которых указывается, что в результате проведённых комплексных исследований был разработан новый класс проводников, кабелей, токонесущих элементов и токовых вводов на основе ВТСП лент второго поколения, в совокупности представляющий новое направление в кабельной технике, хорошо проработанное теоретически, подтверждённое и проверенное экспериментально.



## **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Представленные в диссертации Фетисова С.С. результаты теоретических и экспериментальных исследований тщательно обоснованы и достоверны. Сформулированные на их основе научные положения, выводы и рекомендации, выносимые на защиту не вызывают сомнений, так как подтверждены данными, полученными на хорошо продуманной, оборудованной современными высокоточными средствами измерений экспериментальной базе, а также результатами расчетно-теоретических исследований с применением известных методов анализа теории электрических цепей и численных расчетов электромагнитных полей.

### **Достоверность и научная новизна полученных результатов**

Научная новизна результатов диссертационной работы Фетисова С.С. заключается в следующем:

1. Созданы методики измерения параметров ВТСП лент и необходимая экспериментальная база с уникальным оборудованием и оригинальными методами обработки результатов.
2. Предложены новые и усовершенствованы существующие математические модели для оптимизации конструкции компактных коаксиальных и триаксиальных силовых ВТСП кабелей.
3. Разработана новая математическая модель для расчета токонесущей способности многоповивного кабеля постоянного тока на основе ВТСП-2 лент с учетом эффекта продольного магнитного поля.
4. Разработана новая математическая модель, и на ее основе выполнена оптимизация системы размагничивания с обмотками из ВТСП крупногабаритных объектов из магнитных материалов.
5. Впервые разработана численная модель электромагнитного поля для оптимизации ВТСП тоководов, работающих во внешнем магнитном поле.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена экспериментально, все разработанные варианты кабелей и ТНЭ верифицированы на



специально изготовленных образцах.

Автором были представлены доклады по результатам диссертационных исследований на 17 международных и всероссийских научно-технических конференциях, при обсуждении которых получены положительные отзывы. По материалам диссертации опубликовано более 35 работ, из которых: 31 статья в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России; 18 работ в базах данных цитирования Scopus и Web of Science. Получено 4 патента на изобретения.

Ряд работ, выполненных в ходе подготовки диссертации, были удостоены Премии Губернатора Московской области для молодых учёных и Премии имени П.Н. Яблочкова Академии наук РФ, что подтверждает актуальность и высокий уровень выполненных исследований.

### **Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов**

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

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В работе достаточно полно изложены подходы конструирования и оптимизации токопроводящих частей кабелей и проводов постоянного и переменного тока, но мало затронут вопрос используемой изоляции в данных конструкциях. Существуют ли какие-либо особенности и ограничения на используемые типы изоляционных материалов? Существуют ли результаты испытаний и проводился ли анализ применяемой изоляции?
2. В пятой главе изложены результаты исследований по разработке и созданию обмоток ВТСП трансформатора. Были ли проведены испытания, как самих обмоток, так и трансформатора на полигоне, на основании каких методик и



нормативных документов проводились данные испытания?

3. В пятой главе представлены результаты исследований и разработки обмоточных ВТСП проводов с различными типами изоляции, в результате которой в мелкосерийное производство пошли обмоточные провода с волокнистой и пленочной изоляцией, а на проводах с эмалевой изоляцией не были достигнуты целевые параметры. В результате осталось не ясным возможность изготовления проводов с эмалевой изоляцией и существуют ли области, где их применение перспективно?
4. Необходимо было бы более полно объяснить причину небольшого сдвига фаз между повивами одной фазы триаксиального ВТСП кабеля.
5. Требуют пояснений принятые допущения при численном анализе электромагнитного поля кабелей и ТНЭ, и как принятые допущения могли повлиять на обоснованность сделанных выводов.
6. Желательно сделать более четкий обобщающий вывод об изменении критической плотности тока лент в различных применениях: отдельные ленты, коаксиальные кабели различной конструкции, триаксиальные кабели, при постоянном и переменном токе и др.
7. Есть некоторая небрежность в оформлении диссертации и автореферата, встречаются опечатки, неправильное использование терминов, неясность изложения.

Перечисленные недостатки не снижают научную и практическую значимость диссертационной работы Фетисова С.С.

### **Заключение**

Диссертация Фетисова Сергея Сергеевича по теме: «Исследования и разработка токонесущих элементов коаксиальных кабелей, тоководов и проводников на основе высокотемпературных сверхпроводящих материалов второго поколения», представленная на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.09.02 – «Электротехнические материалы и изделия», является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержатся



разработанные автором научно-технические основы создания новых конструкций сверхпроводящих кабелей, токовводов и токонесущих элементов на основе высокотемпературных сверхпроводников, относящиеся к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации и вносящей ощутимый вклад в развитие экономики страны.

Автореферат и публикации автора полно отражают содержание выполненных и представленных в диссертации результатов исследований.

Диссертация Фетисова С.С. соответствует требованиям пунктов 9-14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 со всеми последующими внесенными изменениями, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.02 - «Электротехнические материалы и изделия».

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Электромеханики,  
электрических и электронных аппаратов»  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский  
университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»)

Подпись Курбатова Павел Александрович  
удостоверяю  
начальник управления по  
работе с персоналом

Подпись доктора технических наук Курбатова П.А. удостоверяю:

Н.Г. Савин



« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

111250, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово,  
ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1

Тел. 8-910-445-55-75, e-mail: kurbatovpa@mpei.ru