

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ
ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

СТЕНОГРАММА

Заседание объединенного совета ДМ 002.262.01
от 16 декабря 2015 года
(протокол №9)

Защита диссертации Новикова Михаила Станиславовича на соискание
ученой степени кандидата технических наук на тему
«Разработка, изготовление и исследования сильноточных токонесущих элементов из
ВТСП лент 2-го поколения»

Специальность 01.04.13 - Электрофизика, электрофизические установки

Москва – 2015

СТЕНОГРАММА

Заседания объединенного диссертационного совета ДМ 002.262.01
при Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН
при участии

Объединенного института высоких температур РАН

Протокол №9 от 16 декабря 2015 г.

Председатель – Председатель диссертационного совета ДМ 002.262.01
д.ф.-м.н., профессор, академик РАН Лагарьков А.Н.

Секретарь – Ученый секретарь диссертационного совета ДМ 002.262.01
к.ф.-м.н. Кугель К.И.

Председатель:

Уважаемые члены совета, кворум имеется. Совет утвержден в составе **20** человек.

На заседании присутствуют **20** членов совета, из них докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации – **19**.

| | | |
|--------------------|-------------------------------------|----------|
| 1.Лагарьков А. Н. | д.ф.-м.н., профессор, академик РАН | 01.04.13 |
| 2.Якубов И. Т. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.13 |
| 3.Амиров Р. Х. | д.ф.-м.н., ст. научный сотрудник | 01.04.13 |
| 4.Кугель К. И. | к.ф.-м.н. | 01.04.13 |
| 5.Антонов А. С. | д.ф.-м.н. | 01.04.13 |
| 6.Батенин В. М. | д.т.н., профессор, чл.-корр. РАН | 01.04.13 |
| 7.Василяк Л. М. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.13 |
| 8.Виноградов А. П. | д.ф.-м.н., профессор | 01.04.13 |
| 9.Деньщиков К. К. | д.т.н., профессор | 01.04.13 |
| 10.Жук А. З. | д.ф.-м.н. | 01.04.13 |
| 11.Зейгарник В. А. | д.т.н., ст. научный сотрудник | 01.04.13 |
| 12.Карпухин В. Т. | д.т.н., ст. научный сотрудник | 01.04.13 |
| 13.Кисель В. Н. | д.ф.-м.н., доцент | 01.04.13 |
| 14.Лебедев Е. Ф. | д.т.н., профессор | 01.04.13 |
| 15.Парфенов Ю. В. | д.т.н., ст. научный сотрудник | 01.04.13 |
| 16.Пухов А. А. | д.ф.-м.н. | 01.04.13 |
| 17.Рахманов А. Л. | д.ф.-м.н. | 01.04.13 |
| 18.Сарычев А. К. | д.ф.-м.н. | 01.04.13 |
| 19.Сон Э. Е. | д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. РАН | 01.04.13 |
| 20.Федоренко А. И. | д.т.н., ст. научный сотрудник | 01.04.13 |

Программа достаточно короткая – у нас одна защита кандидатской диссертации на соискание степени кандидата технических наук, Новикова Михаила Станиславовича, документы у вас все есть.

Секретарь:

Новиков Михаил Станиславович окончил институт МИРЭА и с 1997 по 2000 год учился в аспирантуре Курчатовского института, с тех пор продолжает работать в Курчатовском институте, и в настоящее время он исполняет обязанности начальника лаборатории сверхпроводниковых электроэнергетических устройств. Фактически его диссертация была готова в прошлом году, но, к сожалению, как раз в этот момент, после предзащиты, умер его научный руководитель Виктор Ефимович Кейлин. Научным

консультантом стал Михаил Израилевич Сурин, который нам все доложит, также есть все документы, характеристика, заключение от организации, где выполнялась диссертация, от ведущей организации, от оппонентов, отзывы на автореферат.

Председатель:

Предоставляю слово Новикову Михаилу Станиславовичу

Новиков М.С.:

Докладывает работу, текст доклада прилагается, стенографирование не производилось.

Председатель:

Спасибо. Садитесь, пожалуйста. Вопросы, пожалуйста, к Михаилу Станиславовичу.

Жук А.З.:

Одна из основных задач – по токоограничению. Скажите, пожалуйста, в чем преимущества и недостатки сверхпроводникового токоограничителя как с технической, так и с экономической точки зрения? И второй вопрос – сама сверхпроводниковая часть разработана в России или за рубежом?

Новиков М.С.:

Сначала относительно преимуществ и недостатков. Недостатки – это необходимость охлаждения жидким азотом и, пока еще, дороговизна ВТСП ленты, хотя это со временем отойдет на второй план. Из достоинств, по сравнению с другими типами, можно выделить возможность с неоднократным повторением довольно глубоко ограничивать ток короткого замыкания за миллисекунды и при этом не создавать каких-либо падений напряжения в рабочем режиме, каких либо потерь энергии, кроме потерь на охлаждение, которые тоже относятся к недостатку. Поскольку в ряде ведущих западных, японских и корейских фирм ведутся такие разработки и стоят уже прототипы в сетях, работают в тестовом режиме, то эти устройства имеют перспективу. Если проводит анализ его будущей стоимости, когда это устройство выйдет на коммерческий уровень, оно, конечно, будет перспективным. И к вопросу производства – в образцах, которые рассмотрены в работе, использовалась иностранная лента, американской компании SuperPower, но уже в настоящее время есть и отечественная лента с такими и даже лучшими свойствами, потому что идет прогресс, так что это можно делать полностью у нас.

Председатель:

Еще вопрос, пожалуйста.

Зейгарник В.А.:

Вы говорили о токе 900 А и напряжении 27 кВ – не очень высокие параметры, это что, просто первый шаг или есть какие-либо принципиальные ограничения?

Новиков М.С.:

Принципиального ограничения нет. Есть скорее ограничение пока что по стоимости, но вот сейчас, например, компания SuperOx замахивается на 220 кВ, так что, видимо, уже нет ограничений. По току тоже – можно повышать.

Зейгарник В.А.:

А у вас эти параметры были четко определены?

Новиков М.С.:

Да, они были определены проектным заданием, это финансировалось по проектам «Росатом» по программе «Сверхпроводниковая индустрия».

Сон Э.А.:

А по трансформаторам – для трансформатора эти токонесущие элементы могут использоваться?

Новиков М.С.:

Для трансформаторов и других переменноточных применений нужно разрабатывать отдельную конструкцию, потому что данная конструкция все-таки предназначена для стационарных и импульсных магнитов. На переменном токе у нее все-таки, по крайней мере, по расчетам, слишком большие потери в длинномерных кусках. Будет, скорее всего, разрабатываться отдельная конструкция. Это не столько трансформаторы, это еще быстропеременные магниты.

Сарычев А.К.:

В одном из отзывов референта упомянуто, что эта конструкция может найти применение для японского FFHR – что это такое?

Новиков М.С.:

FFHR – это стелларатор, то есть термоядерный реактор с обмоткой геликоидального типа, она довольно сложная. Этот токнесущий элемент, пожалуй, там применен быть не может, и он там совершенно не нужен. В отзыве было написано по-другому. Там применяется другой токнесущий элемент, который состоит из стопки ВТСП лент в кондуите. Самая главная особенность, из-за чего они пошли на температуру в 20 К – на FFHR обмотка разборная, иначе ее просто невозможно сделать. Существует множество резистивных спаев примерно наноомного сопротивления, поэтому из-за тепловыделений они не остались на гелиевых температурах, а подняли температуру...

Председатель:

На самом деле это замечание не имеет отношения к диссертации. Вы это не используете, так я понял? И нельзя использовать.

Новиков М.С.:

Да, мы это не используем. Не имеет отношения.

Председатель:

Еще, пожалуйста, вопрос

Василяк Л.М.:

Скажите, пожалуйста, а при импульсных токах какие минимальные длительности, при которых (энергия) должна диссипироваться? Какие длительности фронта?

Новиков М.С.:

Испытывали на десятки миллисекунд, но при этом это было в жидком азоте и с током значительно больше критического, и ничего не происходило, то есть вопрос температуры – при гелиевой температуре это будут совершенно другие времена, чем при водородной. Так конкретно не могу сказать без привязок (к температуре и току), это надо считать для каждого конкретного случая.

Сон Э.Е.:

Вы рассказывали про 380 В 250А, это 100 кВт примерно, т.е. 10^5

Новиков М.С.:

Я рассказывал про 380 В 250 А, это мощность сети переменного тока, а не выделяющаяся в токоограничителе – здесь тоже вопрос отключения – дело в том, что обязательно необходимо применение быстродействующего выключателя с десятками миллисекунд времени срабатывания, лучше вообще несколько миллисекунд, тогда экономится длина ленты. А энергия выделяется – десятки джоулей на метр ленты.

Председатель:

Еще вопросы?

Амиров Р.Х.:

Есть ли какая-либо специфика в системах охлаждения – принудительное, или специальные устройства. Вы используете только жидкий азот, или что-то еще?

Новиков М.С.:

Пока что, в этой работе, образцы испытывались в жидком азоте и в жидком гелии. Планируется в дальнейшем – поэтому взята медная трубка в качестве формера – проточное охлаждение. Это будет прокачанное охлаждение газообразным гелием, а также может быть жидким гелием, жидким азотом, жидким водородом, чем угодно.

Председатель:

Еще вопросы? Вопросов нет, спасибо большое, садитесь, пожалуйста. Слово предоставляется научному консультанту Новикова д.т.н. Сурину Михаилу Израилевичу. Его нет, но он прислал отзыв.

Секретарь:

Хочу напомнить, что фактически работа выполнялась под руководством Виктора Ефимовича Кейлина, после его смерти научным консультантом стал руководитель того же отдела, в котором работал соискатель, поэтому он не случайно был выбран.

Зачитывает отзыв научного консультанта, Сурина М.И. Стенографирование не производилось, отзыв прилагается.

Вполне положительный отзыв.

Председатель:

Спасибо. Продолжим.

Секретарь:

Теперь – заключение от организации. Заключение от НИЦ «Курчатовский институт» – отмечается актуальность работы, отмечается довольно подробно личный вклад, достоверность полученных результатов, научная новизна, практическая значимость, апробация – что работа на многих конференциях докладывалась, отмечены публикации. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности «электрофизика, электрофизические установки». Заключение было обсуждено на заседании научного семинара НИЦ «Курчатовский институт» «Фундаментальные и прикладные исследования сверхпроводимости», на котором присутствовали ученые и специалисты (79 человек) из ведущих в этой области организаций (перечислены организации). Заключение подписано заместителем руководителя семинара Кругловым, ученым секретарем семинара Журавлевой, и утверждено заместителем директора Курчатовского института.

Заключение ведущей организации – НИИЭФА им. Ефремова. Отзыв положительный. Довольно подробно излагается содержание диссертации, описываются результаты, достоверность, практическая значимость. В конце имеются замечания: положительно характеризуя работу Новикова, можно высказать, однако, некоторые замечания – литературный обзор содержит недостаточно информации, непосредственно связанной с разработкой сильноточных токонесущих элементов. Приведенные описания устройств часто не имеют непосредственного отношения к теме диссертации. Второе – вопросы устойчивости разработанных токонесущих элементов к механическим напряжениям, возникающим в магнитных системах, требует более подробного рассмотрения. В некоторых случаях напряженность и деформированное состояние токонесущих элементов может свести на нет преимущества, заявляемые диссертантом. В работе не приведены экспериментальные и расчетные исследования распределения токов между ВТСП лентами геликоидального токонесущего элемента и токонесущего элемента ограничителей тока, в том числе на переменном токе. Резюмируя, можно отметить уклон работы в сторону практического результата. Теоретическому обоснованию уделено меньше внимания. В заключение утверждается, что работа удовлетворяет требованиям ВАК, а соискатель достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Также имеются четыре отзыва на автореферат. Первый отзыв – от учреждения «проектный центр ИТЭР», подписанный к.т.н. Лелеховым Сергеем Андреевичем, отзыв положительный, однако имеется замечание, а именно: применение разрабатываемой конструкции токонесущего элемента в токамаках и в других крупных установках

индустриальной физики вряд ли будет оправдано при максимальных полях на обмотке меньше 16 Тл, за исключением некоторых особых случаев, например японского (стелларатора) FFHR. Для полей до 16 Тл целесообразно применение низкотемпературных сверхпроводников на основе Nb_3Sn , а ВТСП 2-го поколения нужно будет в следующем поколении токамаков с плотной плазмой и при поле на обмотке 16-23 Тл. Тогда же производство ВТСП проводов сможет стать достаточно массовым для применения в токамаках. Тем не менее, начинать разработку токонесущих элементов из ВТСП 2-го поколения необходимо уже сейчас, и хорошо, что такая работа ведется.

Председатель:

Заключение положительное?

Секретарь:

Заключение положительное

Далее отзыв, подписанный заместителем генерального директора – директором подразделения к.т.н. Абдюхановым Ильдаром Мансуровичем. Отзыв положительный, в качестве недостатков работы следует отметить следующее: автору стоило бы проанализировать разграничение возможных областей применения токонесущих элементов из ВТСП 2-го поколения и токонесущих элементов из других сверхпроводников – $NbTi$, Nb_3Sn , MgB_2 и ВТСП 1-го поколения. Кроме того, можно было бы сделать замечание о некотором недостатке внимания к материалам изоляции, формера, кондуита для геликоидального токонесущего элемента. Здесь возможны технологические решения, которые существенно улучшат механические, термодинамические параметры. Возможно, это будет сделано на следующих этапах работы по созданию сильноточных магнитов.

Отзыв д.т.н., профессора Ковалева Константина Львовича, МАИ. Отзыв также положительный, имеется замечание – из реферата не ясно, проводил ли автор количественное сравнение разработанных в диссертации токонесущих элементов с зарубежными и отечественными аналогами.

Отзыв из института физики высоких энергий, подписанный д.ф.-м.н. Козубом Сергеем Сергеевичем. Отзыв также положительный. Имеются замечания: недостаточно внимания уделено переменным и быстропеременным режимам и диссипации энергии, а также ряду нюансов конструкции токонесущих элементов – изоляции, кондуиту, материалам и конструкции формера. Возможно, это бросается в глаза потому, что работа представляет собой хотя и заверченный, но лишь первый этап по созданию сильноточных ВТСП магнитов и устройств, и невозможно на данном этапе учесть все аспекты создания устройств.

Председатель:

Пожалуйста, Михаил Станиславович, Вам предоставляется слово для ответа на замечания.

Новиков М.С.:

В отзыве ведущей организации было три замечания. Первое, у меня в литературном обзоре описаны все же токонесущие элементы. Согласен, что этот обзор несколько раздут за счет описания устройств. Это было сделано для того, чтобы попытаться спрогнозировать условия работы токонесущих элементов в них, потому что нужно начинать разрабатывать токонесущие элементы для устройств, которых пока еще нет. По вопросу механической устойчивости токонесущих элементов – вообще, по моему мнению, это должно рассматриваться при проектировании уже конкретных магнитов. Но вообще у меня в работе сделаны несколько предварительных исследований – это, в первую очередь, эксперимент в жидком гелии в поле 8 Тл при токе 4 кА – сила Лоренца прижимала незакрепленный токонесущий элемент к плоской поверхности, и он это выдержал, то есть проведено предварительное механическое испытание. Кроме того, проводились испытания на разрывной машине одновременно на прижатие (к круглой оправке) и на растяжение. И производились испытания на изгиб. А также эта работа будет продолжаться по разработке

магнитов. И вопрос распределения тока в переменных режимах и по потерям – были сделаны эксперименты на коротких образцах, но поскольку для длинномерных образцов с распределением тока происходят некоторые феномены, увеличивающие потери при увеличении длины образца, то начата разработка методики расчета распределения токов. И первые расчеты показали, что для переменных токов нужно разрабатывать отдельную конструкцию, примерно понятно, какую – там должна быть изоляция между слоями, ну и другие нюансы. Эта работа планируется.

Замечания на автореферат.

Замечание Лелехова Сергея Андреевича относительно применения ВТСП токонесущих элементов при полях на обмотках (он говорил про токамаки) больше 16 Тл. Это, в принципе, справедливо, но есть исключения. Это, во-первых, упомянутый FFHR, в котором будет другой тип токонесущего элемента, а во-вторых, ВТСП дает возможность создания уникального сочетания механических и тепловых свойств, стабильности, размещения каналов охлаждения благодаря своей высокой рабочей плотности тока. Поэтому в некоторых магнитах, например, в проектируемом термоядерном источнике нейтронов, возможно, целесообразно применение и начиная с 12 Тл.

Абдюханов Ильдар Мансурович, ВНИИНМ им. Бочвара. Условия разграничения между ВТСП 2-го поколения и другими сверхпроводниками – это вещь сугубо индивидуальная и размытая, то есть для каждого устройства нужно оценивать отдельно, но можно сказать: пока что из-за цены нужно везде, где можно, использовать низкотемпературные сверхпроводники и MgB_2 . Но есть ниши, где ВТСП 2-го поколения уже сейчас необходимо использовать – это высокие поля, и также это азотные температуры, и промежуточные температуры с полями в несколько Тл. А со временем, когда будет массовое производство ВТСП 2-го поколения, то и в других условиях нужно будет считать для каждого устройства.

Козуб Сергей Сергеевич, Институт физики высоких энергий. Мы с ним обсуждали исследования быстропеременных режимов, и какую конструкцию нужно делать для быстропеременных магнитов. Опять-таки, это относится к дальнейшим работам, это будет сделано. Ну и то замечание, которое относится к кондуитам и изоляции – все это будет делаться в работах по магнитам.

Ковалев Константин Львович, МАИ. Мне, конечно, следовало в автореферате более подробно отразить литературный обзор. В принципе, у меня все это в диссертации есть.

Председатель:

Все, да? Спасибо. Слово предоставляется официальному оппоненту доктору технических наук Высоцкому Виталию Сергеевичу.

Высоцкий В.С.:

Добрый день, уважаемые коллеги! Я не буду зачитывать отзыв, просто скажу – эта диссертация и защищающийся, можно сказать, уже слегка перезрел. Он давно известен в наших кругах, прекрасный экспериментатор, у него много хороших и нужных работ, в частности то, что он представил как диссертацию. Это абсолютно актуальная тема. Он доложил, что у него два направления – токоограничители, а это до сих пор самая популярная тема на всех конференциях, где обсуждается применение высокотемпературной сверхпроводимости в электроэнергетике. Больше всего работ на эту тему. По некоторым выражениям это most wanted сверхпроводящие устройства в современном мире, и, в принципе, любые работы на эту тему, а в России это, я бы сказал, первая капитальная диссертационная работа, я надеюсь, подтянутся от Леонида Михайловича люди тоже в этом плане. Это очень нужно и актуально. А второй тренд в современном использовании высокотемпературной сверхпроводимости это использовать ее при очень низких температурах, водородной, жидкого гелия. Тем самым сильно увеличивается плотность тока. Дело в том, что низкотемпературные сверхпроводники своего предела достигли, из них больше выжать ничего нельзя. Если надо уходить за поля 12-15 Тл, повышать плотности тока и прочее, то уже единственным способом является

использование высокотемпературных сверхпроводников, но при гелиевых температурах. Это очень большой и мощный тренд. Но высокотемпературные сверхпроводник – это пока что ленты, а вот как из лент набрать токонесущий элемент с большим током – это большой вопрос, и вот один из вариантов, представленный диссертантом, это то, что называется CORC cables, которые позволяют эту проблему как-то решить. И два этих направления достаточно хорошо и полно экспериментально изучены и расчетно обоснованы, и, в общем, сомнений в достоверности, правильности и прочего у меня, как у оппонента, не возникает. Замечания, конечно, имеются. Да, работа очень практична, даже создание этого намоточного устройства это чисто практическое дело, результаты новые, получены лично автором. Нас, к сожалению, в прикладной сверхпроводимости становится все меньше и меньше, и мы, конечно, все друг друга знаем, знаем, кто чего делал. Замечания у меня, я бы сказал, весьма несущественные, но я обязан их представить. Первое, это то, что было очень остроумно разработано устройство для намотки вот этих вот кабелей вокруг круглого формера, сделано, испытано. Но это все сделано на коленке, а я как представитель кабельного института, у которого есть кабельный заводик, там у нас это делалось бы и гораздо быстрее, и на гораздо более высоком уровне. Ну, видимо было финансирование, надо было делать. Про механическую деформацию, тоже здесь говорилось, было бы желательно более детально ее проанализировать при изготовлении такого геликоидального токонесущего элемента. И то, что здесь уже задавали вопросы про переменный ток – когда Михаил готовил эту диссертацию, было много разговоров, а могут ли такие круглые элементы нести переменный ток. Ответ – вот в таком изготовлении – нет. Они только для относительно медленно меняющегося тока, а на переменном токе 50 Гц не могут работать. Тем не менее, численный анализ такого перераспределения тока был бы очень полезен, чтобы узнать границу, где такой элемент может быть использован. Потому что главный конкурент Михаила Станиславовича, молодой голландский американец, который даже фирму организовал по изготовлению таких токонесущих элементов, пока не может ответить на вопрос, где вот такие круглые токонесущие элементы могут быть использованы на переменном токе. Вопрос животрепещущий. Но все это скорее пожелания на будущее, а так действительно, диссертация трудовая, выстраданная, отработанная и доработанная. Мое мнение – я призываю вас голосовать за эту работу и присудить степень.

Председатель:

Спасибо большое. Пожалуйста, ответьте на замечания.

Новиков М.С.:

По первому замечанию, по разработке технологий изготовления. Конечно, у нас производство не промышленное, опытное, даже, скорее, машина для изготовления опытных партий для экспериментальных магнитов. Конечно, в дальнейшем нужно будет делать масштабирование и промышленную технологию. И, возможно, тогда мы это обсудим с Виталием Сергеевичем, чтобы, может быть, в сотрудничестве это сделать. Про механическую устойчивость я уже говорил, что это планируется по конкретным конструкциям. И по поводу переменных токов, расчеты пока показывают, что такая конструкция токонесущего элемента на переменных токах не применима, сейчас думаем, какую разработать конструкцию, модифицировать как-то. Я не включал все это в работу, даже сделанные эксперименты.

Председатель:

Спасибо. Слово предоставляется официальному оппоненту, доктору физико-математических наук профессору Фишеру Леониду Михайловичу.

Фишер Л.М.:

Здравствуйте, уважаемые коллеги! Здесь много было сказано как диссертантом, так и в отзывах на реферат, и оппонентом, поэтому я позволю себе все пункты, как полагается, не перечислять. Вместе с тем, так получилось, что вся эта работа начиналась под моим пристальным вниманием. Потому что эта работа началась, когда начиналась программа по прикладной сверхпроводимости, в частности, токоограничителям, и я был руководителем темы, а Курчатовский институт был нашим соисполнителем. И в рамках работ по созданию моделей токоограничивающих устройств, где в качестве ленты использовалась лента 2-го поколения, для того, чтобы иметь сопротивление, достаточное для токоограничения, использовалась лента, не покрытая дополнительно медью. В этом случае, если пропускать ток, даже постоянный, но относительно долго, лента нагревается и сгорает. И наши многоуважаемые коллеги из Курчатовского института, и наш многоуважаемый подзащитный, пытались с этим бороться. И они быстро, и именно по инженерному правильно нашли решение. Они намотали катушку из ленты без меди на дополнительную подложку, на которой была медь. И, в результате, модель сработала. Но уже на этой стадии исполнители работ поняли, что вот просто работать с лентами неправильно, нужно создавать именно элемент, с помощью которого можно наматывать разного рода устройства. Фактически работа посвящена именно разработке и улучшению характеристик этих элементов. Что я увидел для себя интересного, это то, что при создании этого токонесущего элемента были внимательно изучены, в том числе, механические свойства, что обычно не делается. Здесь были изучены продольные, поперечные напряжения. Ленты разных производителей имеют разное механическое напряжение и поэтому по-разному работают в тех или иных устройствах. В этом плане я думаю, что сама идея создания токонесущих элементов для изготовления сверхпроводниковых устройств, это правильное направление. И шаг в этом направлении сделан. Как заметил предыдущий оппонент, это было не единственное решение, но это было решение своевременное, независимое, и сильно дополняющее то, что существовало. Теперь с точки зрения замечаний. Есть замечания, конечно. Но я не буду, наверное, их зачитывать, сокращенно, времена отключения рассматриваются относительно большие – десятки миллисекунд. В то же время сейчас имеются быстродействующие отключающие устройства, и можно сэкономить количество ленты для изготовления тех или иных устройств, потому что в этом случае ленты не успеют нагреться. Теперь по поводу расчетов, которые делались по теплоотводу. Поскольку здесь в основном в номинальном режиме тепловыделения нет, грубо говоря, лента находится при температуре жидкого азота, то когда возникает экстремальный ток, лента переходит и начинается тепловыделение, то это – импульсный процесс тепловыделения. В этом случае, помимо тех механизмов теплоотдачи, которые были учтены в диссертации, еще существует механизм простой теплопроводности. И оказывается, что теплопроводность при импульсных нагревах на первых миллисекундах отводит до половины всей мощности. Этого в расчетах не было. Были показаны результаты измерения потерь, в то же время никаких расчетов, как они распределяются, как распределяются поля, как все это вместе коррелируется, в диссертации проведено не было. Я думаю, что эти замечания, хотя они, естественно, улучшили бы содержание работы, но в целом работа действительно выполнена полезная, хорошая, актуальная, нужная, и видно, что у этой работы есть дальнейшее продолжение. Надо иметь в виду, что, вообще говоря, характеристики сверхпроводящих лент все время меняются и улучшаются. И поэтому те наработки элементов тоже будут со временем меняться, и силы будут другие, и напряжения будут другие. Но, тем не менее, дорога проложена, поэтому это полезная деятельность. Я думаю, что члены совета не ошибутся, если проголосуют «за».

Председатель:

Спасибо большое. Пожалуйста, ответьте на замечания оппонента.

Новиков М.С.:

По замечанию Леонида Михайловича по быстродействующим выключателям – да, действительно, если в будущем будут работы по токоограничителям, конечно, надо будет постараться, и, в том числе, может быть, использовать разработанный у Леонида Михайловича пятимиллисекундный выключатель. Это уникальная вещь, по-моему, самый быстрый на сегодня. Пока использовались такие вот времена отключения, тогда. Конечно, сейчас надо меньше. По поводу численных расчетов распределения переменного тока – да, есть методика, и я сейчас занимаюсь методикой расчета распределения переменного тока в многоленточных токонесящих элементах. Это не было включено в работу, поскольку не доделано, не проверено экспериментально. И относительно теплоотвода в азот за счет механизма теплопроводности – поскольку в этих экспериментах использовались времена отключения десятки миллисекунд, то, конечно, там это не так существенно, не половина, да, есть, в какой-то мере. Это будет учтено в будущем.

Председатель:

То есть Вы согласны с замечанием?

Новиков М.С.:

Я согласен, что в будущей работе его следует учесть, и еще есть такой аспект, что, когда мы обсуждали это с Леонидом Михайловичем, то возникла идея эксперимента, за какое время развивается процесс пузырькового кипения. На основе акустической эмиссии можно будет исследовать это в зависимости от выделяемой мощности.

Председатель:

Спасибо. Леонид Михайлович, Вы удовлетворены ответом?

Фишер Л.М.:

Да.

Председатель:

Спасибо. Тогда переходим к дискуссии. Кто хочет выступить?

Рахманов А.Л.:

С трудом меня можно назвать специалистом по технической сверхпроводимости ...

Пухов А.А.:

Всего две книжки написал...

Рахманов А.Л.:

На меня эта диссертация произвела очень положительное впечатление, она, по-моему, заметно превосходит среднюю кандидатскую диссертацию по этой тематике. Ну и я знаю отзывы других специалистов, которые непосредственно занимаются технической сверхпроводимостью, они все считают, что диссертант вполне достоин, диссертация очень хорошая. Я могу только призвать совет голосовать «за».

Председатель:

Ну и на меня как на председателя совета диссертация очень положительное впечатление произвела, многое сделано, вполне достойная диссертация. Кто-нибудь еще хочет выступить? Вам предоставляется заключительное слово.

Новиков М.С.:

Спасибо всем присутствующим, выступавшим, за такую поддержку!

Председатель:

Хорошо. Выбор счетной комиссии. Ваши предложения.

Секретарь:

У меня предложение следующее – Сон, Пухов и Жук.

Председатель:

Есть ли возражения против данной счетной комиссии? Прошу проголосовать.

Проходит открытое голосование – единогласно утверждён состав счетной комиссии.

Председатель:

Прошу счетную комиссию приступить к работе.

Происходит процедура подсчета. Двадцать бюллетеней – все «за».

Жук А.З.:

Уважаемые члены диссертационного совета! В урне было обнаружено 20 бюллетеней, 20 «за», «против» нет, недействительных – нет.

Председатель:

Замечательные результаты, прошу утвердить протокол. «За»? «Против»?

Происходит открытое голосование за утверждение протокола – протокол утвержден единогласно.

Единогласно, утверждено. И нам нужно обсудить проект заключения. Есть замечания?

Василяк Л.М.:

На четвертой странице предпоследний абзац «результаты опубликованы в рецензируемых изданиях» - журнал может быть рецензируемый, но не в списке ВАК

Председатель:

«включенных в перечень ВАК». Сколько в перечне ВАК?

Новиков М.С.:

Шесть

Василяк Л.М.:

И в конце, там, где апробация результатов, «семь из десяти основных публикаций также подготовлены лично автором», а три? Надо исправить.

Сарычев А.К.:

Мне вот тоже непонятно, страница 4, 2-й абзац: разработка перечисленных устройств с применением описанных сильноточных ВТСП может вестись, в частности... Ученый совет полагает, что оно может вестись в Курчатовском институте?

Председатель:

Почему нет?

Сарычев А.К.:

Но это разве мнение ученого совета?

Василяк Л.М.:

Внедрение устройств и токонесущих элементов может быть выполнено...

Председатель:

Нет возражений? Договорились. Есть еще замечания? Замечаний больше нет, тогда я предлагаю проголосовать по проекту заключения с учетом замечаний, кто «за»? Против? Воздержался?

Происходит открытое голосование по принятию проекта заключения с учетом замечаний. Принято единогласно.

Председатель:

Принято единогласно. Давайте поздравим с очень короткой защитой!

Председатель диссертационного совета ДМ 002.262.01
д.ф.-м.н., профессор, академик РАН



Лагарьков А.Н.

Ученый секретарь диссертационного совета ДМ 002.262.01
к.ф.-м.н.

Кугель К.И.

Текст доклада Новикова М.С.

Уважаемый председатель, уважаемые члены совета, разрешите представить вам свою диссертацию на соискание степени кандидата технических наук, по специальности «электрофизика, электрофизические установки».

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

Современная лента из высокотемпературного сверхпроводника (сокращенно ВТСП) 2-го поколения представляет собой структуру, показанную на слайде. Ее максимальный ток при температуре 77 К составляет от 100 до 600 А. Здесь приведены зависимости ее критического тока от магнитного поля и температуры, что показывает, что ее ток составляет не более несколько сотен А в рабочих условиях. Основные преимущества ВТСП 2-го поколения по сравнению с остальными сверхпроводниками – относительно высокие рабочие поля и температуры.

Актуальность работы состоит в том, что ряд перспективных устройств, которые перечислены на слайде, требуют сильноточных токонесущих элементов, сокращенно ТНЭ с токами в единицы и десятки кА.

Цели и задачи работы – это разработка и изготовление прототипов токонесущего элемента сверхпроводниковых токоограничителей (сокращенно СОТ), а также разработка конструкции гибкого сильноточного ТНЭ (сокращенно ТНЭ) малого диаметра из ВТСП-2 лент, намотанных по спирали многими параллельными лентами в несколько слоев на круглые гибкие формеры.

Новизна работы состоит в том, что разработаны конструкции и технологии изготовления, сформулированы рекомендации по изготовлению и применению в устройствах.

Практическая ценность состоит в том, что применение разработанных конструкций и технологий позволит создать сильноточные ВТСП-2 устройства. Первый этап этой работы уже сделан – эта диссертация.

На защиту выносятся:

- разработка и исследования токонесущих элементов для токоограничителей, экспериментальное устройство для намотки токоограничителей;
- разработка, изготовление и исследования прототипов токоограничивающих элементов;
- разработка конструкций, изготовление и исследование образцов гибкого сильноточного геликоидального ТНЭ из ВТСП-2 лент;
- выработка рекомендаций к применению геликоидального ТНЭ;
- а также разработка технологии изготовления длинномерных кусков этого токонесущего элемента.

В первой главе произведен обзор литературы, который содержит обзор современных ВТСП лент, сильноточных токонесущих элементов и устройств, где они могут применяться, а также другие тематики, связанные со стабильностью, защитой.

Некоторые важные источники представлены на слайде, всего их 77 цитируемых работ, не буду представлять все.

Произведен обзор конструкций разных типов токонесущих элементов и сравнение их между собой. Основные типы токонесущих элементов это: твистированная стопка лент, ребель – аналог Резерфордской скрутки в ВТСП, геликоидальный элемент – CORCC (Conductors on Round Core Cable). И различные токонесущие элементы, представляющие собой модификацию вышеперечисленных базовых ТНЭ, в основном для применения в токамаках.

Также проведен обзор по токоограничителям различных конструкций. Подчеркнута важность применения защитного отключения и байпасов.

Глава 2 посвящена разработке токонесущих элементов для токоограничителей на 250 А действующего значения тока.

Сверхпроводниковый ограничитель тока (СОТ) короткого замыкания (КЗ) – единственный класс устройств, который способен глубоко ограничивать ток короткого замыкания уже на 1-й полуволне (за несколько миллисекунд) и при этом не имеет потерь в рабочем режиме. Ограничение тока происходит за счет нелинейной вольтамперной характеристики ВТСП. Поставлена цель – разработка токонесущего элемента на 250 А, и задачи:

- модули токоограничителя должны быть низкоиндуктивные
- должна быть обеспечена токонесущая способность
- защита от сгорания ВТСП лент при коротком замыкании
- технология автоматизированной намотки
- и методика расчета всех параметров

Проведены исследования ВТСП лент – токонесущей способности в малых полях, транспортных потерь, а также процессов, происходящих при переходе лент, и в некоторых случаях вызывающих их перегорание на так называемых «горячих пятнах» - локальных понижениях токонесущей способности.

Разработана конструкция токонесущего элемента и способ намотки модулей – здесь они неразделимы. Конструкция состоит из двух ВТСП лент, между которыми проложена дополнительная резистивная лента. Обмотка бифилярная, между слоями находится слой полиимидной изоляции. Такие модули были изготовлены и успешно испытаны в режиме короткого замыкания. Резистивная лента нужна для того, чтобы обеспечить защиту ВТСП при коротком замыкании, особенно на пониженных напряжениях.

Разработано и изготовлено устройство для автоматизированной намотки модулей. На схеме показана намотка модуля СОТ. Также это устройство использовалось для изготовления коротких образцов геликоидального токонесущего элемента.

Также была разработана расчетная методика, которая позволяет обчислять эти модули, то есть, заложив параметры сети и количество сверхпроводника, получить глубину токоограничения, температуру нагрева, время восстановления, необходимое время отключения и все другие параметры. Это методика моделирования тепловых процессов в токоограничивающем токонесущим элементе. Также при помощи данной методики произведено моделирование экспериментов по изучению «горячего пятна» и исследование распространения теплового фронта при сгорании. Методика учитывает охлаждение жидким азотом, в нее вводятся справочные данные по охлаждению и другие параметры, в том числе сильно размытая вольтамперная характеристика ВТСП.

В главе 3 описывается разработка токонесущего элемента на 900 А действующего значения. Поставлены задачи: обеспечить равномерное распределение тока между шестью параллельными лентами, низкая индуктивность, при этом улучшенное охлаждение, то есть бифилярные пары обмоток находятся на разных каркасах, чтобы улучшить охлаждение азотом; и компенсация краевых эффектов собственного поля.

Эскизный проект такого токоограничителя подразумевает вот такую конструкцию (на слайде), 10 бифилярных пар катушек. Расчетная длина токонесущего элемента – чуть меньше километра.

Изготовлены образцы ТНЭ из 3и 6 лент, а также бифилярные петли из 6 лент. Разработана методика измерения распределения токов между лентами при помощи массива датчиков Холла, показана схема, по полю восстанавливались токи.

Исследована токонесущая способность на постоянном и на переменном токе, процессы в токовых терминалах и связанное с ними распределение тока по трем лентам, а также транспортные потери для различных образцов.

Краевые эффекты поля – было рассчитано распределение поля для образца из трех витков и для проектируемого токоограничителя. Получается, что на краях находятся пики поля, которые снижают токонесущую способность всего устройства. Поэтому предложено шунтировать крайние ленты крайних витков дополнительной ВТСП лентой, и это подняло

токонесущую способность до ожидаемого уровня – на 100 А на трехленточном токонесущем элементе. То есть желаемый эффект был достигнут.

Глава 4 посвящена разработке геликоидального токонесущего элемента. Цель – разработать токонесущий элемент для крупных и импульсных ВТСП магнитных систем. Задачи: получить сочетание параметров – высокой токонесущей способности, низких потерь в переменных режимах, высокой тепловой стабильности и устойчивости к растяжению и сжатию в обмотке магнита, а также удобство производства и применения. Выбран геликоидальный (частично транспонированный) тип токонесущего элемента, поскольку он оптимально удовлетворяет этому сочетанию и является наиболее универсальным. И по механическим свойствам есть анализ работ, где он показал себя очень хорошо.

Вначале были исследованы ВТСП ленты и проведен выбор конструкции. Ленты должны выдерживать геликоидальную намотку на малый диаметр, соответственно, проверили, и получили конструкции лент и марки лент от производителей, которые этому удовлетворяют. Также исследовалась токонесущая способность лент.

Произведен расчет геометрии, то есть углов и шагов намотки образцов токонесущего элемента, сделаны и исследованы образцы.

В первую очередь исследовалась токонесущая способность образцов в собственном поле и во внешних полях. Некоторое снижение, как было найдено, обусловлено влиянием собственного поля. Были проведены исследования механических свойств на разрывной машине, а также в поле 8 Тл при прижатии к плоской поверхности. Механические свойства удовлетворяют требованиям. Токи в высоких полях у токонесущих элементов практически равны ожидаемой сумме токов лент. Рассчитана деформация ВТСП слоя. Здесь была проблема в том, что ВТСП слой довольно хрупкий, и были сомнения, наматывать ли его на такие диаметры. Из того приближения, что влияет только деформация в направлении протекания тока для моих образцов, были выполнены расчеты влияния деформации. Они показали, что деформация не влияет на токонесущую способность для диаметра 6 мм при намотке под углом 30-45 градусов. Рассчитано распределение собственного поля, оно тангенциальное, и немного снижает критток при испытаниях в азоте в поле собственного тока.

В главе 5 рассматривается производство и рекомендации по применению. Основная цель – научиться изготавливать длинномерные куски.

Задачи: разработать технологию изготовления, воплощенную в экспериментальном намоточном устройстве для изготовления длинномерных кусков, а также выработать рекомендации по применению токонесущих элементов в ряде устройств, и рекомендации по изготовлению.

Спроектировано и изготовлено «в металле» экспериментальное намоточное устройство, диаметр приемной и отдающей бобин здесь около метра. На фото показан принцип намотки. Это устройство позволяет одновременно, за один проход наматывать до 16 ВТСП лент, общее число лент не ограничено. Формеры сейчас используются в виде медной трубки, для применения в качестве канала охлаждения.

Изготовлены образцы, в том числе десятиметровой длины, и успешно испытаны. Они показали полный ожидаемый ток, деградации при изготовлении не происходит, то есть технология изготовления работает. Также сделаны низко резистивные токовые терминалы с использованием дополнительных ВТСП лент. Экспериментальный токовый терминал приведен на слайде.

Рекомендации по применению ТНЭ разработаны для некоторых устройств, в частности, для токамаков. Сделан вывод, что если несколько сотен современных лент намотать на соответствующие формеры, заизолировать и вложить в конduit, то уже можно делать токонесущий элемент для токамаков. Расчеты производились для разных вариантов проектируемых термоядерных источников нейтронов.

Также существуют перспективы космических применений – безэлектродные плазменные двигатели высокой мощности с высокочастотным нагревом, и защита экипажа космических кораблей от протонов галактического происхождения с энергией до 1 ГэВ.

Выработаны рекомендации по применению ВТСП лент (и рекомендации производителям), и по применению ТНЭ в устройствах. Необходимо использовать ленты с тонкой подложкой, а по устройствам важнее всего разрабатывать конкретные конструкции.

По работе в целом можно сделать выводы:

- выработаны рекомендации для разработки конструкций сильноточных ВТСП-2 токонесящих элементов
- разработан способ изготовления длинномерных кусков сильноточного геликоидального токонесящего элемента
- разработаны конструкции и изготовлены образцы сильноточного геликоидального токонесящего элемента, который позволит в перспективе создать ряд устройств – проведенные исследования показали пригодность такого типа конструкции токонесящего элемента для магнитов
- разработаны конструкции сильноточных токонесящих элементов для токоограничителей с рабочими токами до 900 А
- проведенные исследования и разработки резистивных токоограничителей позволят создать ряд промышленных устройств с различными параметрами.

Мой личный вклад, вкратце, заключается в том, что все результаты, получены либо мной лично, либо при моем активном участии, подробнее он приведен на слайде.

И, конечно же, я хочу поблагодарить тех людей, без которых этой работы либо не было бы, или она была бы гораздо хуже – они перечислены на слайде.

Спасибо за внимание.

ОТЗЫВ

научного консультанта д.т.н. Сурина М.И. о М.С. Новикове

Новиков М.С. проявил себя как инициативный и квалифицированный исследователь, а также разработчик ряда устройств и методик, значительная часть которых собрана и отлажена его руками. Он владеет методиками экспериментальных исследований и численного моделирования, обладает широкими знаниями в области ВТСП токонесущих элементов и устройств. Новиков М.С. способен не только решать научно-технические задачи или давать идеи для их решения, но и ставить такие задачи.

За время создания Новиковым М.С. его диссертации им было опубликовано 10 научных работ по теме, в том числе 6 статей в реферируемых журналах из списка ВАК. Научные результаты Новикова М.С. многократно докладывались на международных и российских конференциях. В большинстве этих публикаций М.С. Новиков был ответственным автором, а почти на всех конференциях и семинарах выступал докладчиком. Во время выполнения работы он являлся руководителем преддипломной практики и дипломных работ трех студентов – две из них уже защищены, все они входят в тематику диссертации. В настоящее время, являясь научным сотрудником, Новиков М.С. выполняет обязанности начальника лаборатории и курирует в отделе направление сильноточных ВТСП токонесущих элементов, а также перспективные направления – по космическим применениям ВТСП, и по ВТСП в устройствах термоядерного синтеза.

Исходя из вышеизложенного, считаю, что Новиков М.С. заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 - электрофизика, электрофизические установки.

Отзыв написан для представления в ученый совет ДМ 002.262.01 при Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН при участии Объединенного института высоких температур РАН.