**ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ОИВТ РАН В ОБЛАСТИ ПРИКЛАДНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ**

Веселовский А.С.

Альтов В.А., Батенин В.М., ,,,

Сычев В.В., Иванов С.С., Копылов С.И.

Работы в области прикладной сверхпроводимости были начаты в Институте высоких температур Академии наук СССР в 1962—1963 гг. в связи с проводимыми институтом работами в области МГД-метода преобразования энергии. Появление такого направления в институте было весьма своевременным, т.к. в 1961-1962 гг. было создано новое поколение сверхпроводящих материалов, которые открывали неограниченные возможности для практического применения в различных областях науки и техники. Опыт работы при низких температурах был приобретен (при поддержке акад. Капицы П.Л.) в лаборатории чл.корр. Алексеевского Н.Е. в ИФП АН СССР. Успешная стажировка сотрудников в области низких температур и сверхпроводимости привела уже в 1963 г. к изготовлению и удачным испытаниям первого сверхпроводникового соленоида. Тематике в дальнейшем уделялось большое внимание со стороны Президиума Академии наук, ГКНТ и руководства Института высоких температур.



Рис.1 На представленной фотографии Гончаров С.П. (ГКНТ), вице-президент АН СССР акад. Кирилин А.В., Президент АН СССР акад. Келдыш М.В., вице-президент АН СССР акад. **Миллионщиков** **М**.**Д**. (сидят, слева на право), сотрудники ИВТ АН СССР: Сычев В.В., Андрианов В.В., Альтов В.А., Зенкевич В.Б. (стоят, слева на право), в отделе прикладной сверхпроводимости.

На протяжении всех лет своего существования отдел прикладной сверхпроводимости проводил работы двух типов: исследования фундаментальных физико-технических проблем, связанных с созданием сверхпроводниковых магнитных систем, и работы по созданию конкретных магнитных систем.

**В 1962—1966 гг.** был выполнен комплекс исследований некоторых аспектов переходных процессов в сверхпроводящих обмотках. Помимо исследований переходных процессов, связанных с появлением нормальной зоны в обмотке [1;2], были теоретически и экспериментально исследованы процессы намагничивания сверхпроводящих соленоидов при изменении в них тока [3;4]. Необходимость такого исследования определялась тем, что на переходные процессы в сверхпроводящих соленоидах в определенных условиях существенно влияет намагниченность обмотки соленоида.

Для описания магнитного поведения сверхпроводящего соленоида была использована функциональная связь между током, протекающим по обмотке, и полным магнитным потоком (потокосцеплением) соленоида. Специфика магнитного поведения сверхпроводящего соленоида определяется изменением внутреннего потокосцепления.

Проведенные исследования позволили впервые получить полную картину зависимости между индуктивностью сверхпроводящего соленоида и током, протекающим по обмотке, а также влияния метода измерения индуктивности на ее величину (статическая, динамическая, внешняя индуктивность) и магнитной предыстории соленоида.

На основе модели критического состояния были получены теоретические выражения, расчеты по которым удовлетворительно согласуются с экспериментом.

**В 1967—1971 гг.** было выполнено всестороннее комплексное исследование закономерностей возникновения, существования и распространения нормальной зоны в сверхпроводящей обмотке. Такое исследование было необходимым с точки зрения правильного понимания и прогнозирования поведения сверхпроводящих обмоток в различных режимах их работы, для разработки системы критериев надежности сверхпроводящих магнитных систем. Цель этой работы, сочетавшей в себе теоретические разработки и экспериментальные исследования, состояла в решении двух основных задач.

Во-первых, необходимо было исследовать условия равновесия нормальной зоны в комбинированном проводнике. При этом исследованию подлежали два возможных случая: температура проводника одинакова по всей его длине, по длине проводника имеет место градиент температуры.

Во-вторых, необходимо было исследовать основные закономерности процесса распространения нормальной зоны по комбинированному проводнику. Эти исследования были проведены для всех трех возможных типов условий теплоотдачи с поверхности комбинированного проводника: комбинированный проводник в большом объёме кипящего жидкого гелия; комбинированный проводник в условиях разреженной обмотки и комбинированный проводник в условиях плотной обмотки (в отсутствии непосредственного доступа жидкого гелия к внутренним виткам обмотки).

Известная теоретическая модель комбинированного проводника в изотермических условиях, предложенная Стекли в 1965 г., была модернизирована с учетом существенно нелинейного характера зависимости коэффициента теплоотдачи с поверхности комбинированного проводника к гелиевой ванне (кризис кипения), а также с учетом существенной температурной зависимости удельного сопротивления материала подложки комбинированного проводника и ряда других эффектов (контактное сопротивление на границе «сверхпроводник — подложка»; градиенты температуры вдоль проводника, и по радиусу сверхпроводящей жилы).

На этой основе были рассчитаны вольтамперные характеристики комбинированного проводника для изотермических условий. Подробно исследованы области неустойчивых состояний проводника. При этом, в частности, было введено представление о так называемом максимальном токе равновесия, ограничивающем область токов, при которых возможны равновесные состояниям проводника.

Экспериментально подтверждено существование неустойчивых равновесных состояний комбинированных проводников с параметром Стекли **α**>1 при *Т<ТС* (*ТС*- критическая температура), максимального тока равновесия, а также области неустойчивых состояний проводника при *Т>ТС*. Установлена теоретически и подтверждена экспериментально неправильность в общем случае известного положения о том, что в условиях деления тока между сверхпроводником и подложкой ток в сверхпроводнике равен критическому току при данной температуре сверхпроводника.

Проведено исследование условий равновесия нормальной зоны в комбинированном проводнике с продольным градиентом температуры. Теория равновесия комбинированного проводника для этих условий была построена с учетом кризиса кипения гелия. Выполнено экспериментальное изучение вольтамперных характеристик комбинированного проводника при наличии градиента температуры, хорошо подтвердившее справедливость разработанной теоретической модели.

Были изучены основные закономерности процесса распространения нормальной зоны в разреженной сверхпроводящей обмотке: исследовано влияние условий охлаждения обмотки на характерные параметры процесса распространения нормальной зоны, исследовано влияние температуры гелиевой ванны на процесс распространения нормальной зоны и установлено, что с понижением температуры ванны (переход к охлаждению гелием II) надежность обмотки понижается, осуществлено прямое измерение скорости распространения нормальной зоны вдоль комбинированного проводника в диапазоне токов *Im<I<Ic.*

Выполнено экспериментальное исследование условий равновесия и процесса распространения нормальной зоны в плотной сверхпроводящей обмотке. При этом установлено, что по сравнению с разреженной обмоткой плотная обмотка более надежна в отношении опасности пережога при распространении нормальной зоны, но значительно менее надежна в отношении опасности пробоя электрической изоляции в этом процессе.

Таким образом, в результате проведения этого комплексного исследования была получена достаточно полная картина явлений, имеющих место при возникновении, существовании и распространении нормальной зоны в обмотках сверхпроводящих магнитных систем.

**В 1968—1973 гг.** было проведено всестороннее исследование так называемого эффективного сопротивления неидеальных сверхпроводников II рода. Эта задача весьма важна в связи с вопросом о величине потерь энергии в сверхпроводящих обмотках, работающих на переменном токе или в режимах быстрого изменения постоянного тока.

Объектом экспериментальных и теоретических исследований в этих работах было влияние осциллирующего внешнего магнитного поля на постоянный ток, протекающий по неидеальному сверхпроводнику II рода. При этом существенным является вопрос о появлении некоторого эффективного сопротивления постоянному току, т. е. совершается ли источником тока какая-либо суммарная работа за один цикл изменения поля, и будет ли затухать транспортный ток в замкнутом сверхпроводящем контуре при изменении магнитной индукции в материале, из которого изготовлен этот контур.

В результате проведенных исследований было обнаружено наличие такого сопротивления. Было показано, что наличие эффективного сопротивления объясняется тем обстоятельством, что распределение индукции в слоях обмотки при увеличении и уменьшении внешнего поля не одинаково, так что при наличии тока в слое в среднем за цикл его пересекает некоторый магнитный поток. Были получены аналитические выражения для порогового значения амплитуды внешнего осциллирующего поля и эффективного сопротивления. Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов дало удовлетворительное совпадение.

Несколько более сложен для рассмотрения случай короткозамкнутого сверхпроводящего соленоида, находящегося в условиях возмущений внешнего магнитного поля. Следует отметить, что этот случай весьма важен для ряда практических случаев использования, короткозамкнутых сверхпроводящих магнитных систем.

В короткозамкнутом сверхпроводящем соленоиде при циклическом изменении внешнего магнитного поля происходит циклическое изменение тока, стремящегося поддержать постоянным сцепленный магнитный поток. При определенном значении амплитуды изменения внешнего поля магнитный поток начинает пересекать обмотку соленоида таким образом, что средний за период ток в соленоиде уменьшается, а величины поля вне обмотки и в центральном отверстии соленоида выравниваются.

В течение ряда лет в институте проводились работы по созданию конкретных сверхпроводящих магнитных систем, генерирующих поперечное магнитное поле в канале.

В 1964—1965 гг. была создана небольшая сверхпроводящая магнитная система с овальными катушками, которая впервые была использована во взрывном МГД-генераторе мощностью более 1 МВт, сечение «теплого» канала этой системы составляло 35X70 мм2, длина участка однородного поля —150 мм, индукция в центре 1,5 Т. В процессе эксперимента в течение нескольких суток магнитная система работала в режиме «замороженного тока» при отключенном источнике питания. При этом не было обнаружено сколько-нибудь заметного уменьшения величины магнитной индукции. Система успешно выдержала транспортировку и ударные нагрузки, обусловленные взрывом ВВ. Максимальная мощность, полученная на генераторе, составила 1200 кВт при длительности импульса 35 мксек.

В 1970 г. была испытана сверхпроводящая магнитная система СПМС-0,5 с седлообразной обмоткой, имеющая общую длину 500 мм и наружный диаметр 285 мм; диаметр теплого канала криостата системы —100 мм.

Данная система была создана в качестве модели значительно более крупной седлообразной сверхпроводящей магнитной системы — так называемой системы СПМС-1, монтаж которой завершился в 1974 г. Основные параметры этой системы таковы: «теплый» внутренний диаметр — 30,5 см, длина участка однородного магнитного поля —120 см, напряженность поперечного магнитного поля — 4 Т, рабочий ток в обмотке 1000 А, материал обмотки — индированный кабель из многожильного комбинированного проводника на основе Nb—Ti.

В плане работ по созданию сверхпроводящих накопителей энергии для энергетикив 1970 г. было впервые выполнено исследование процесса разряда сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии с запасенной энергией 10 кДж через инверторный преобразователь в городскую сеть переменного тока. Данный накопитель энергии был впервые применен для накачки лазера импульсной энергией свыше 1 кДж.

Итак,в течение 1963—1974 гг. в Институте высоких температур АН СССР были исследованы процессы намагничивания сверхпроводящих соленоидов при изменении тока, проведен детальный анализ условий существования и распространения нормальной зоны в сверхпроводящей обмотке, исследовано эффективное сопротивление неидеальных сверхпроводников II рода и предложен механизм для объяснения его природы, создан ряд сверхпроводящих устройств различного назначения.

**В 1975 году**, по завершению комплекса экспериментов и теоретических разработок, ведущими сотрудниками отдела Альтовым В.А., Зенкевичем В.Б., Кремлевым М.Г. и Сычевым В.В. была издана книга «Стабилизация сверхпроводящих магнитных систем». Книга посвящена важнейшей проблеме, стоящей перед создателями сверхпроводящих магнитных систем, — стабилизации обмотки магнитной системы.

|  |  |
| --- | --- |
|  | Рис.2 Монография «Стабилизация сверхпроводящих магнитных систем».  В книге подробно рассмотрены вопросы тепловой (криостатической) и внутренней стабилизации сверхпроводящих обмоток. Первое издание книги на русском языке вышло в 1975 г., второе — в 1984 г., третье переработанное и дополненное в 2008 г. под редакцией В.В. Сычева. В 1978 г. книга издана в США на английском, а в 1982 г. — в Китае на китайском языке. |

**В период 1975—1976 гг.** на основе разработанных теоретических и технических подходов был создан ряд сверхпроводящих магнитных систем (в т.ч. накопителей энергии) для обеспечения планируемых в отделе исследований и разработок. На фото представлены соленоиды импульсного типа на рабочее напряжение до 60 кВ.

|  |  |
| --- | --- |
|  | Они позволяли создавать индукции магнитного поля до 5,5 Тл и в режиме разряда обеспечивали скорости изменения магнитного поля до 1500 Тл/сек. Испытания соленоидов подтвердили правильность, как конструкционных, так и технологических решений. Соленоиды данного типа были использованы при изучении потерь энергии в широком диапазоне исследуемых параметров для большого ряда композитов. Изучение потерь энергии при экспоненциальной форме изменения магнитного поля были проведены калориметрическим методом. |

Для исследований в переменном магнитном поле, т.е. для измерения намагниченности и потерь энергии в сверхпроводниках, использовался электрический метод. Были проведены эксперименты на модельных обмотках из сверхпроводника, создана высокочувствительная установка и проведен комплекс исследований, в результате которого были разработаны методы, позволяющие на практике проводить расчет тепловыделений в сверхпроводящих обмотках в широком диапазоне возможных ситуаций.

Были проведены оценки скорости затухания транспортного тока в короткозамкнутых обмотках при наличии внешних электромагнитных воздействий. Ряд выявленных закономерностей составляет необходимую методическую основу для экспериментальных исследований.

Конструкция сверхпроводящего обмоточного провода всегда представляет собой компромисс в попытке удовлетворить различным, часто противоречивым требованиям. Результаты выполненной работы позволили корректно учитывать факторы, связанные с диссипативными процессами, при разработке конструкций проводников, оптимальных для заданных условий их применения, а также правильно формулировать задачи технической политики, направленной на создание новых более совершенных типов сверхпроводящих материалов.

**В 1974- 1984 гг.** экспериментальные работы, проводимые в отделе для изучения потерь энергии в сверхпроводниках, сопровождались теоретическими разработками и исследованиями, которые проводил заведующий отделом В.Б. Зенкевич.

В результате проведенного цикла работ были впервые разработаны и получены [5-8]:

- Совокупность аналитических выражений для расчета гистерезисных потерь в плоском слое с учетом зависимости критической плотности тока от магнитной индукции, при одновременном изменении приложенного магнитного поля и транспортного тока, а также метод расчета потерь при существенном влиянии поверхностных эффектов.

- Совокупность аналитических выражений, основанных на аппроксимации результатов численного расчета процесса проникновения поперечного магнитного поля в сверхпроводящий цилиндр, дающая возможность вычислять гистерезисные потери в сверхпроводниках круглого сечения.

- Концепция сопряженных источников энергии, диссипирующей в сверхпроводящих материалах (источник переменного поля и источник транспортного тока), дающая методическую основу анализа диссипативных процессов при наличии транспортного тока и позволяющая проводить расчет средних значений напряженности электрического поля в проводнике и затухания тока в замкнутой полностью сверхпроводящей цепи при наличии внешних электромагнитных воздействий.

- Теория матричных потерь при малых уровнях возбуждения переменным магнитным полем, основанная на модели анизотропного магнитного сверхпроводящего континуума. Полученные в квазилинейном приближении аналитические выражения для потерь в матрице и гистерезисных потерь в сверхпроводящей части композита при различных видах зависимости внешнего магнитного поля от времени.

- Теория потерь в сверхпроводящем композите при высоких уровнях возбуждения, позволяющая записать дифференциальные уравнения для магнитного момента проводника при изменении приложенного магнитного поля и провести приближенный расчет потерь численными методами.

- Методика расчета коллективного взаимодействия витков, позволяющая распространить результаты, полученные для одиночного проводника, на сверхпроводящую обмотку.

Применимость модельных представлений, использованных при теоретическом анализе, подтверждена комплексом экспериментально полученных результатов.

С высокой интенсивностью (вплоть до 1990 г.) в отделе проводились работы по созданию новых сверхпроводниковых магнитных систем (СПИН) и сопровождающих их расчетно-теоретических [9-14] и экспериментальных исследований [15-16]. Под руководством д.т.н. В.В. Андрианова была создана серия импульсных СПИН. В дальнейшем (после 1990 г.) разработки сфокусировались на сверхпроводниковых накопителях энергии для электроэнергетики.

Расчетно-теоретические исследования были посвящены разработке рациональных способов секционирования сверхпроводниковых магнитных систем СПИН. Был разработан комплекс инженерных методов расчета таких систем, детально проработаны вопросы их стабилизации. Большое внимание уделялось расчетам многообмоточных СПИН. Было проведено расчетно-теоретическое исследование процесса перехода в нормальное состояние СПИН с параллельным включением секций и решена задача по управлению током в СПИН при разряде на комплексную нагрузку. Практически каждая из разработанных тем включала расчеты по гистерезисным потерям энергии в системах и использованных в них сверхпроводящих материалах.

В ОИВТ РАН к настоящему моменту времени завершен этап экспериментального моделирования, разработана и создана серия СПИН с запасенной энергией в пределах от 0,07\*106 до 5,0\*106 Дж (Таблица 1). На основании экспериментального опыта и созданной теоретической базы подготовлен технический проект опытно - промышленного СПИН с запасенной энергией 108 Дж. Разработаны, созданы в кооперации с ВНИИКП (г. Подольск) и экспериментально исследованы по необходимым параметрам варианты токонесущих элементов на 2,5 - 5\*103 А на основе низкотемпературных (Nb-Ti) проводников.

Таблица 1

Сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии ОИВТ РАН

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование  параметра | Наименование магнитной системы СПИН | | | | | | |
| **Н-17** | **Сфера-1** | | **Сфера-2** | **РКН-Э1** | **РКН-Э** | **СЭН-Э** |
| Запасённая энергия, МДж | 1.5 | 0.07 | | 2.6 | 0.5 | 5.0 | 100 |
| Номинальный ток в проводнике, А | 1500 | 570 | | 1125 | 1100 | 1250 | 5000 |
| Максимальное напряжение при выводе энергии, кВ | 60 | 60 | | 60 | 120 | 200 | 4 |
| Индукция магнитного поля в центре, Т | 3.2 | 3 | | 4.5 | 4.5 | 3.6 | 5 |
| Максимальная мощность, МВА | 500 | 30 | | 60 | 60 | 125 | 20 |
| Размеры обмоток |  | | | | | | |
| внутр. диаметр, м | 0.53 | | 0.21 | 0.55 | 0.22 | 0.55 | 0.86\* |
| внеш. диаметр, м | 0.65 | | 0.4 | 1.22 | 0.54 | 0.96 | 1.22\* |
| высота, м | 1.16 | |  |  | 0.73 | 2.58 | 3.0 |
| Тип обмотки | Цилин-дричес-кая | | Сферическая с экранирующей обмоткой | | Цилиндрическая | | Цилиндри-ческая,  4 модуля. |
| Уровень разработки | эксперимент | | | | | | Тех. проект |

Примечание:\*Размеры указаны для одного модуля 4-х модульной магнитной системы.

**В 1980-1986 гг.** было проведено комплексное экспериментальное исследование токонесущей способности технических сверхпроводников. Создана экспериментальная установка, позволяющая с минимальными затратами жидкого гелия исследовать максимальные транспортные токи комбинированных сверхпроводников в диапазоне от 102А до 1,5∙104А и при скоростях ввода тока в образец до 5∙103А/с; при индукциях магнитного поля 0÷7 Тл. Разработан эффективный метод измерения предельных параметров сверхпроводников в условиях, аналогичных режимам работы проводников в сверхпроводниковых магнитных системах.

Была исследована токонесущая способность проводников (изготовленных на основе *Nb-Ti* сплавов), различающихся по конструкции, размерам, числу сверхпроводящих жил (от 6 до 1,8∙104). Исследованы зависимости максимальных транспортных токов от скоростей ввода тока, изменения магнитного поля и условий охлаждения. Показано, что плотность максимального транспортного тока заметно уменьшается при переходе от базисного элемента к следующей по размеру структуре проводника, даже в высоких внешних полях. Максимальный транспортный ток в пределах 15÷25% зависит от величины внешнего теплоотвода. В результате исследования вольтамперных характеристик впервые было показано, что параметры ВАХ сильноточных сверхпроводников можно рассчитать на основе данных по ВАХ составляющих провод элементов. На основании сопоставления эксперимента с теорией Минца Р.Г. и Рахманова А.Л. показано, что величина предельного транспортного тока комбинированного сверхпроводника определяется высокой дифференциальной проводимостью σ(Е) исследованных проводников в области малых электрических полей (Е<10-4В/м).

Была доказана применимость соотношений теории для количественных расчетов в условиях, когда основным возмущающим воздействием является нагружение магнитной системы током; во всем диапазоне исследуемых параметров для коротких образцов экспериментальные результаты описываются с точностью 5÷10%. Выводы, полученные из экспериментов на коротких образцах, были проверены по результатам испытаний созданной в ИВТАН магнитной системы с запасаемой энергией 0,5 МДж.

**В период 1987-1997 гг.** были получены результаты, которые охватывают широкий круг вопросов, связанных с особенностями тепловых и электромагнитных процессов, протекающих в комбинированных сверхпроводниках и в токонесущих элементах на их основе [17].

Установлено скейлинговое поведение величины критической энергии *E*c, качественно описываемое на основе представлений о локальном и импульсном характере теплового возмущения, разрушающего сверхпроводимость в комбинированном сверхпроводнике. Такая закономерность позволяет систематизировать экспериментальную информацию о *E*c, полученную вблизи минимального тока распространения нормальной зоны *I*p для проводников с различными свойствами и геометрией.

Резистивным методом исследованы характеристики криостабильности единичного токонесущего элемента плоского СП кабеля в условиях ухудшенного теплообмена с охладителем. Показана возможность определения минимального тока распространения *I*p путем использования линейной экстраполяции зависимости . Независимыми методами – резистивным и индуктивным – в диапазоне магнитных полей 1−5 Тл экспериментально исследованы электрофизические характеристики единичного композита плоского СП кабеля; рассмотрена возможность оценки величины тока *I*p на основе анализа резистивного состояния проводника в рамках метода с накачкой магнитного потока.

Экспериментально изучена криостабильность стабилизированного токонесущего элемента конструкции многоэлементного проводника при наличии волокнистой органической изоляции различной структуры и толщины. Установлено, что для обмотки с вертикальными каналами охлаждения предпочтительно использование сетчатых изолирующих покрытий с размером ячейки, близким к размеру отрывного диаметра пузыря *D*0 (≅ 100 μм) и толщиной ≈100 μм. Экспериментально показано, что создание щелевых зазоров (~*D*0) вблизи внешней поверхности каналов охлаждения при глубине канала *b*=(1.8−2.6) мм улучшает стабильность токонесущего элемента.

Исследованы особенности теплоотвода со структурно-неоднородной поверхности стабилизатора плоского СП кабеля при наличии сетчатой органической изоляции. Установлено, что для такой поверхности, охлаждаемой жидким азотом, коэффициент теплоотдачи в области низких тепловых потоков (*q*<10 кВт/м2) заметно возрастает по сравнению с гладкой поверхностью.

Выяснено, что при определенной величине теплового потока *q*tr для указанной поверхности могут наблюдаться несколько вариантов переходных процессов, в том числе колебательных; в зависимости от условий на поверхности образца (наличие канала, тип изоляции) переход может завершаться как быстрым достижением пленочного режима кипения, так и установлением промежуточного стационарного состояния, подобного второму режиму пузырькового кипения на поверхностях с пористыми покрытиями. В последнем случае возможно превышение критической величины теплового потока более чем на 20% по сравнению с гладкой поверхностью.

При помощи матричного метода получен дискретный спектр собственных частот, определяющих темп экспоненциального затухания соответствующего собственного тока в плоском СП кабеле. Найдено, что в зависимости от типа симметрии для каждого отдельного распределения собственных токов, полученный спектр может быть разложен на синусоидальные составляющие. Показано, что в области минимальных собственных частот собственные токи представляют собой синусоидальные длинные тόковые петли. В области высоких частот распределение собственных токов в рядах кабеля также является синусоидальным.

Полученные результаты развивают существующие представления о криостабильности сверхпроводников с учетом особенностей теплоотвода, присущих обмоткам из многоэлементных токонесущих элементов в реальных условиях эксплуатации и могут найти применение при разработке и конструировании магнитных систем различного назначения, в том числе при проектировании обмоток СПИН, а также при решении таких вопросов как оценка уровня стабильности и темпа затухания экранирующих токов, выбор параметров изоляции и оптимальных размеров каналов охлаждения. Данные, полученные по теплообмену, могут быть полезны при проектировании других устройств, использующих в качестве охладителей криогенные жидкости.

**В 1998-2006 гг.** были развернуты работы по исследованию электрофизических свойств и возможностей применения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) для решения проблем токоограничения. Моделирование и исследования проводились в основном на керамических монодоменных образцах иттриевой системы.

Компенсация или локализация магнитного потока, проходящего через сверхпроводящий замкнутый контур, позволяет рассматривать такой контур в качестве переключателя магнитного потока, который может быть использован в качестве токоограничивающего индуктивного сопротивления. Была разработана математическая модель, позволяющая исследовать различные режимы работы сверхпроводниковых токоограничителей различных типов, изготовлена экспериментальная установка, моделирующая работу токоограничителя и его различные режимы. Проведено исследование на различных по параметрам рабочих обмотках и ВТСП-кольцах, влияющих на режимы работы токоограничителя.

Был проанализирован ряд недостатков токоограничителей данного типа. Нелинейные характеристики такого токоограничителя приводят к возникновению высших гармонических в регулируемой им цепи. Разница между током перехода ВТСП-элемента в нормальное состояние и током возврата в сверхпроводящее состояние достаточно велика, что может приводить к трудностям в работе токоограничителя при повторном включении. Наличие электропроводности в ВТСП-кольце в нормальном состоянии препятствует выходу устройства на режим холостого хода. Однако все вышеизложенные недостатки не носят принципиального характера. Они могут быть устранены изменением конструкции магнитопровода, геометрической формы ВТСП-колец, а также совершенствованием технологии изготовления ВТСП-керамики.

В процессе исследования токоограничивающего устройства трансформаторного типа было тщательно рассмотрено влияние различных электрических и магнитных параметров и состояния экрана (кольца) на его работу. Исследовано влияние секционирования сверхпроводящих экранов (колец) на работу устройства. Показано, что для таких устройств наиболее удачной является конструкция трансформатора с симметрично-чередующимися обмотками. При этом максимальное снижение индуктивности рассеяния достигается уже при числе групп равном четырём. Показано, что секционирование сверхпроводящего экрана (кольца) приводит к снижению максимальной индукции магнитного поля. А это в свою очередь приводит к увеличению токонесущей способности и глубины экранирования, а также снижению гистерезисных потерь в сверхпроводящих экранах. Получено экспериментальное подтверждение увеличения кратности тока для ограничителя тока трансформаторного типа с помощью секционирования сверхпроводящего экрана.

**В 2007-2009 гг.** экспериментальные исследования уже проводились на длинномерных сверхпроводниковых лентах ВТСП первого и второго поколения. Был проведен критический, в том числе экспериментальный, анализ современного уровня характеристик ВТСП технических материалов первого поколения ведущих мировых производителей; рассмотрены вопросы стабильности и устойчивости проводников в различных режимах охлаждения; возможность применения сверхпроводниковых токонесущих элементов (ТНЭ) в линии электропередач.

Показано, что внесение в конструкцию образцов дополнительной стабилизации, для достижения требуемых технических параметров при использовании в сильноточных сборках энергетического ВТСП кабеля, разрабатываемого на основе ВТСП первого поколения, существенно влияет на временные характеристики процессов перехода в нормальное состояние. Определены основные характеристики сверхпроводников, т.е. критические токи при разных значениях индукции магнитного поля и вольтамперные характеристики, рассмотрена стабильность при различных режимах работы ВТСП провода, изучены возможные режимы охлаждения в жидком азоте, показано влияние условий теплообмена с поверхности проводника на критические параметры и устойчивость проводника к сильным тепловым возмущениям.

Был выполнен анализ электрофизических свойств современных ВТСП-материалов первого поколения сверхпроводников на основе соединения Bi-2223.На основе комплексного исследования был определен базисный ВТСП токонесущий элемент, который по своим электрофизическим характеристикам: токонесущая способность в магнитных полях, форма ВАХ, устойчивость к термоциклированию и старению вполне пригоден для экспериментальных работ, т.е. может быть использован как ВТСП лента, на основе которой могут быть изготовлены образцы моделей ТНЭ электроэнергетического кабеля. Основной вывод реализованных исследований: ВТСП лента EHTS\_2006 производства компании European High Temperature Superconductors (EHTS), обладает необходимыми и достаточными электрофизическими параметрами для использования в исследованиях и разработках по модельной конструкции линии электропередач с транспортным током на уровне 1,0-1,5 кА.

Проведено детальное экспериментальное исследование электро и теплофизических характеристик ВТСП лент 2-го поколения производства компании SuperPower в различных режимах. Показано, что проводники SF12100 (без медного стабилизатора) способны выдерживать нагрузки до уровня *I*0*/I*c~4 (*I*0 – амплитуда импульса тока, *I*c – критический ток проводника) при длительности одиночного синусоидального импульса тока в 10 мс. Свойства ленты не деградируют в результате нагрева в ходе испытаний до средней температуры 200÷250К. Был изучен процесс остывания лент 2-го поколения в жидком азоте после нагрева их импульсом тока, превышающего критическое значение, до 150-260К. Процесс охлаждения в данном температурном интервале включает в себя несколько последовательных стадий, что связано с изменением режима теплоотдачи при переходе от пленочного режима кипения азота на поверхности ленты к пузырьковому.

Проведены исследования ВТСП-лент 2-го поколения с наноразмерными включениями для повышения их критических параметров. Эти эксперименты связаны с разработкой технологии ВТСП-лент 2-го поколения в РФ, которая развивается, начиная с конца 90-х годов на Химическом факультете МГУ им. Ломоносова при участии Института Физики Металлов УрО РАН. В 2006-м году было основано ЗАО «СуперОкс» (www.superox.ru), поставившее перед собой цель создать в России опытное производство ВТСП-лент 2-го поколения. Специалисты ОИВТ РАН реализуют электро и теплофизическое сопровождение данной разработки ВТСП-лент 2-го поколения.

Достижение высоких критических характеристик ВТСП (плотность критического тока > 1МА/см2 при 77К) возможно только в высокотекстурированных покрытиях с толщиной не более нескольких микрон. Повысить устойчивость сверхпроводящих характеристик ВТСП-покрытий к магнитному полю можно за счет внедрения в сверхпроводник несверхпроводящих включений или дефектов. Сверхпроводящие свойства плёнок, содержащих включения BaZrO3, BaCeO3 и Y2O3, изучались с применением бесконтактных методов исследования во внешнем с индукцией до 1 Тл. Во всех случаях поле направлено перпендикулярно плоскости плёночного образца (B//c). Показано, что добавление в пленку включений BaZrO3 приводит к заметному увеличению плотности критического тока в поле около 1 Тл, при оптимальном содержании включений (5-10%) плотность критического тока возрастает в 2 раза. Измерения свойств пленок с включениями BaCeO3 и Y2O3 показали, что этот тип включений не обеспечивает заметного повышения критического тока. Результатом проводимых исследований должна явиться выработка оптимального подхода к повышению критических характеристик ВТСП во внешнем магнитном поле (тип включений, их концентрация).

В период 2007-2009 гг. разрабатывался универсальный метод инженерного расчета полного набора тепловых и электротехнических характеристик сверхпроводящих устройств различного назначения, основанный на общей теории нелинейных элементов электрических цепей. Дано физически корректное определение дифференциальной и статической индуктивностей сверхпроводящих объектов и получены соотношения для их расчета. Разработана программа численного расчета полного набора электротехнических характеристик прямолинейных сверхпроводников и сверхпроводящих колец, возбуждаемых совместным воздействием источника питания и переменного магнитного поля. Получены общие соотношения и создан массив конкретных аналитических формул, который полностью обеспечивает расчеты в наиболее важном для практики случае возбуждения сверхпроводника совместным воздействием источника питания и переменного магнитного поля при прямо пропорциональной связи между значениями магнитного поля и транспортного тока сверхпроводника.

Путем сравнения аналитических и численных расчетов исследована точность метода в широком диапазоне параметров, получены апроксимационные уточняющие функции, благодаря которым точность расчета всех характеристик доведена до значений, удовлетворяющих требованиям практики [18].

Также проведено расчетно-теоретическое исследование теплофизических и электрофизических параметров сверхпроводниковых устройств при их совместной работе. Исследование направлено на создание сверхпроводниковых магнитных систем этих устройств при их совместной работе в энергосистеме для двух случаев: во-первых, обеспечение надёжности работы самой энергосистемы с помощью сверхпроводниковых токоограничителей (СТУ) и СПИН при их совместной работе и, во-вторых, обеспечение бесперебойного снабжения и повышения устойчивости энергосистемы при работе с синхронной нагрузкой, например, для нефтегазоперерабатывающих комплексов, основная нагрузка которых состоит из параллельно работающих синхронных двигателей. Как показали расчёты, энергоёмкость СПИН может быть уменьшена в 1,7-2 раза при использовании устройств в комплексе. Время срабатывания быстродействующего коммутационного аппарата не должно превышать 50-70 мс, в противном случае обеспечение устойчивого энергоснабжения будет проходить по схемам, которые используют только СПИН (без СТУ). Результаты проведённого расчётно-теоретического исследования подтверждают высокую эффективность применения совместной работы СТУ и СПИН для повышения динамической устойчивости энергосистемы [19-20].

На основании разработок отдела в 2008 г. была предложена конструкция быстродействующего ограничителя тока, который позволяет ограничить значения ударного и установившегося токов, иметь быстродействие не более 3 мс. Он обладает способностью автоматического срабатывания и восстановления после устранения тока короткого замыкания. ОИВТ РАН и ОАО «НТЦ Электроэнергетики» разработали, создали макетный образец и провели испытания токоограничителя на напряжение 10 кВ.

**Перспективные направления развития исследований и разработок**

• Разработка конструкций сильноточных ВТСП проводников, без которых нет возможности создавать энергоэффективные устройства на основе новых сверхпроводниковых технологий. Это композиты в диапазоне транспортного тока 1 – 5\*103 А,которые должны быть созданы с учетом влияния на электрофизические параметры базисных лент электромагнитных возмущений и механических напряжений. Будут проведены: исследование параметров стабильности сверхпроводящего состояния для таких проводников в условиях аналогичных обмотке магнитной системы ВТСП устройства; исследование транспортных характеристик, в т.ч. вольтамперных характеристик ВТСП 2-го поколения (базисных лент и композитных многоленточных проводников) в условиях деформирующих воздействий на проводник и различных условий теплообмена с поверхности композита; создано теоретическое описание процессов на постоянном и переменном транспортном токе.

• Будут изучены применения ВТСП технологии в электроэнергетике для создания активно-адаптивных (интеллектуальных) сетей с целью повышения системной надежности электроэнергетической системы. Под активно-адаптивной сетью понимается совокупность подключенных к генерирующим источникам и потребителям электрической энергии линий электропередачи, устройств электромагнитного преобразования электроэнергии, коммутационных аппаратов, устройств защиты и автоматики, информационно-технологических и управляющих систем.

• Будут продолжены расчетно-теоретические исследования по необходимым теплофизическим и электрофизическим параметрам ВТСП второго поколения для разработки оптимальных сверхпроводниковых устройств (накопителей энергии и токоограничителей) на их основе и проведен анализ эффективности применения данных устройств при их совместной работе.

• Разработка полупроводниковых преобразовательных систем для связи СПИН с энергосистемой требует применения новых подходов и решений. В перспективных планах, по этой теме, математическое моделирование преобразователя с индуктивным накопителем энергии в различных режимах работы при управлении на основе теории мгновенной мощности и векторной модуляции тока.

• По разработке и созданию методов численного расчёта (теория, программный продукт, численное моделирование) электротехнических характеристик сверхпроводниковых объектов, в т.ч. ВТСП токоограничителей, сильноточных ВТСП композитов на основе лент 2-го поколения и др., будет создана программа математического моделирования процесса проникновения экранирующих токов в прямолинейные сверхпроводники и осесимметричные сверхпроводящие кольца. Помимо картины распределения экранирующих токов будет рассчитываться полный набор электротехнических характеристик сверхпроводника. Программа позволит:

- Осуществлять комплексный анализ свойств ВТСП сверхпроводников путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных по намагниченности, индуктивности, распределению поля у поверхности образца и т. д.

- Оптимизировать структуру сильноточных ВТСП кабелей путем подбора распределения токонесущих слоев и слоев материала матрицы, обеспечивающего минимальные потери на переменном токе.

- Рассчитывать характеристики изделий из ВТСП сверхпроводников при различных режимах их работы.

• Будет завершена разработка токоограничителя на напряжение 110 кВ. Имеющийся опыт исследований и разработок позволяет в настоящее время создать быстродействующий ограничитель тока для электросетей напряжение до 220 кВ.

КРАТКИЙ СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

**1.** В.В. Сычев, В.Б. Зенкевич, В.В. Андрианов, В.А. Альтов. О скачке критического переменного тока сверхпроводящего соленоида в гелии при переходе через λ-точку. Докл. АН СССР, 1964, т. 159, № 1.

**2.** В.В. Сычев, В.Б. Зенкевич, В.В. Андрианов. Исследование процессов перехода сверхпроводящего соленоида с индуктивной защитой в нормальное состояние. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1965, № 1.

**3.** В.В. Сычев, В.Б. Зенкевич, В.В. Андрианов. Влияние сопротивления защитной цепи на процесс перехода сверхпроводящего соленоида в нормальное состояние. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1965, № 2.

**4.** В.В. Сычев, В.Б. Зенкевич, В.В. Андрианов. Индуктивность сверхпроводящего соленоида. Докл. АН СССР, 1965, т. 165, № 1.

**5.** V.B.Zenkevitch, V.V.Zheltov. Hysteresis losses in a superconducting plate. Cryogenics, 1978, J8,n. 5, 289-295.

**6.** В.В.Желтов, В.Б.Зенкевич. Расчет гистерезисных потерь в сложных сверхпроводящих магнитных системах. Препринт ИВТАН

№ 4-030, М., 1978, 14 с.

**7.** В.Б.Зенкевич, В.В.Желтов. К расчету гистерезисных потерь в сверхпроводящих обмотках. Изв. АН СССР "Энергетика и транспорт", 1979, № 2, 70-79.

**8.** В.Б.Зенкевич, В.В.Желтов, А.С.Романюк. Влияние поверхностных эффектов на гистерезисные потери в сверхпроводниках. Изв. АН СССР "Энергетика и транспорт", 1981, № 3, 89-97.

**9.** V.V. Andrianov, M.B. Parizh, S.I. Kopylov. Superconducting windings with parallel connected sections. IEEE Trans. on Magn. MAG-19(3). 1983. p. 1105-1108.

**10.** В.В. Андрианов, С.И. Копылов Определение параметров сверхпроводниковых катушек с параллельным соединением секций. //Электричество. -1983. -№ 12. -C. 43-46.

**11.** В.Б. Зенкевич, В.В. Желтов, С.И. Копылов. Влияние секционирования сверхпроводящих обмоток на их экономичность по гистерезисным потерям. //Изв. АН СССР Энергетика и транспорт. -1989. -№4. -C. 90-99.

**12.** В.В. Андрианов, В.В. Желтов, С.И. Копылов, А.Ю. Архангельский. Анализ эффективности секционирования тороидальных сверхпроводящих обмоток. //Изв. АН СССР Энергетика и транспорт. -1990. -№1. -C.119-125.

**13.** S.I. Kopylov. The comparison of single- and multi- solenoidal windings for superconducting storage device performance. IEEE Trans. Appl. Supercond. v.3. № 1. 1993. p.215-218.

**14.** В.В. Желтов, С.И. Копылов, А.Ю. Архангельский. Оптимизация обмоток сверхпроводящих индуктивных накопителей энергии. //Изв. РАН Энергетика. -1994. -№2. -C.72-85.

**15.** Аndrianov V.V., Baev V.P., Ivanov S.S., Mints R.G., Rakhmanov A.L. – Superconducting current stability in composite superconductors. Cryogenics, v.22, n.2 (1982), 81-87.

**16.** Andrianov V.V., Baev V.P., Ivanov S.S., Mints R.G., Rakhmanov A.L. – Current-carrying capacity of composites superconductors. IEEE Trans. Magn., v.19, n.3(1983), 240-243.

**17.** Ivanov S.S., Balashov N.N., Pukhov A.A. and Shchegolev I.O. Investigations of current-carrying capacity and quench behaviour of a composite superconductor by magnetic flux pumping method // IEEE Trans. Magn., 1994, vol. 30, № 4, pp. 2462–2465.

**18.** Желтов В.В., «Аналитический расчет электротехнических характеристик прямолинейных сверхпроводников: смешанное возбуждение при преобладающем влиянии источника питания», Электротехника, №3, 2008, стр. 51-59.

**19.** Балашов Н.Н., Иванов С.С., Копылов С.И., Веселовский А.С., Высоцкий В.С., Жемерикин В.Д. Секционирование сверхпроводящих токоограничивающих устройств. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2007, 6, v. 17(2), pp. 1799-1802.

**20.** Альтов В.А. Балашов Н.Н. Иванов С.С., Копылов С.И., Веселовский А.С. Жемерикин В.Д. Повышение надёжности энергетических систем при помощи сверхпроводниковых устройств. J. Superconductivity R&D, N 14, 2009, pp.3–6.