

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А-676

9-80-287

АНИЩЕНКО
Николай Григорьевич

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
РАБОТЫ УСТРОЙСТВ ЭВАКУАЦИИ ЭНЕРГИИ
ИЗ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ
И РАЗРАБОТКА
ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ИХ ОБМОТОК

Специальность: 05.09.04 -
электрофизические установки и ускорители
Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1980

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна.

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор
Зельдович Александр Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Монозон Наум Абрамович
кандидат технических наук,
младший научный сотрудник
Беляев Лев Николаевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Всесоюзный электротехнический институт им.В.И.Ленина, Москва

Защита состоится "___" _____ 1980 г. в ___ час.
на заседании специализированного совета Д-047-01.02 при
Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных
исследований, г.Дубна, Московская область, ЛВЭ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Объединенного института ядерных исследований.

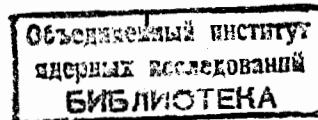
Автореферат разослан "___" _____ 1980 г.

Ученый секретарь
специализированного совета *М.Ф.Лихачев* М.Ф.Лихачев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время разработка и создание крупных физических и энергетических установок с использованием сверхпроводящих магнитных систем (СМС) являются неотъемлемой частью многих национальных программ развития науки и техники. Из действующих СМС физических установок наиболее распространены системы со сверхпроводящими магнитами (СПМ) постоянного тока. При планируемом широком использовании сверхпроводящих устройств в технике будущего решению проблем их надежности и безопасной эксплуатации должно уделяться серьезное внимание уже в настоящее время. Одними из главных в этой связи являются вопросы аварийной эвакуации энергии из крупных СПМ, а также надежности и долговечности электроизоляционных конструкций их обмоток и токовводов. Несмотря на то, что в последние годы количество работ, направленных на обеспечение условий надежной работы СМС, заметно возросло, следует отметить достаточно высокую аварийность существующих сверхпроводящих магнитных систем. Это связано как с работой обмоток СМС в экстремальных условиях (высокие механические нагрузки, плотность тока и магнитные поля, сверхнизкая рабочая температура), так и с отсутствием пока еще достаточного опыта их проектирования и длительной эксплуатации. Поэтому исследования и систематизация особенностей работы различных устройств защиты СПМ, а также процессов, происходящих в самих магнитах при авариях, являются необходимыми и своевременными для обеспечения надежности и безаварийности в работе будущих СПМ.

Целью работы является создание на основе теоретических и экспериментальных исследований устройств защиты и электроизоляционных конструкций сверхпроводящих магнитов постоянного тока; конкретно работа направлена на: 1) разработку и создание устройств эффективной эвакуации энергии из СПМ при авариях; 2) разработку методики расчета переходных электромагнитных и тепловых процессов в сложных СМС с несколькими индуктивно связанными контурами; 3) создание высоковольтной криогенной установки для изучения свойств электроизоляционных материалов и конструкций, используемых в сверхпроводящих устройствах различного назначения; 4) проведение в жидком гелии испытаний на электрическую прочность образцов монолитной и слоистой электроизоляции и некоторых электроизоляционных конструкций сверхпроводящих устройств; 5) разработку и создание высоковольтных токовводов в криостаты с жидким гелием.



Научная новизна основных результатов диссертации: 1) в экспериментах по аварийной эвакуации энергии из СПМ, не обладающего криостатической стабилизацией, впервые показано, что применение в качестве поглотителя энергии кольцевой дугогасительной решетки автомата гашения поля, - вместо традиционного омического сопротивления, - позволяет повысить эффективность эвакуации и снизить достигаемую при этом максимальную температуру обмотки магнита; 2) предложен и реализован в схемах с различными СПМ принцип инициирования электрической дуги непосредственно в промежутках дугогасительной решетки с помощью шунтирующих плавких проволочек; 3) разработана и экспериментально проверена новая методика расчета на ЭВМ переходных электромагнитных и тепловых процессов при эвакуации энергии из СМС, позволяющая, - в отличие от имеющихся ранее, - расчетным путем исследовать указанные процессы в сложных системах с несколькими индуктивно связанными контурами; 4) в экспериментах на моделях проходных изоляторов показано, что зависимость напряжения перекрытия от длины боковой поверхности изоляционного остова, например, из фторопласта в жидком гелии качественно отличается от известных ранее представлений для других сред.

Практическая ценность и значимость работы: 1) на стенде ЛВЭ ОИЯИ введено в опытную эксплуатацию новое устройство защиты СПМ (до 3 кА и 2 МДж), содержащее индукционно-динамический привод контактной системы, отличающийся от серийного большим быстродействием, и шунтированную плавкими проволочками дугогасительную решетку; 2) в процессе создания сверхпроводящей магнитной системы "Кольцевитрон" (в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ): а) изготовлен и введен в эксплуатацию несерийный автомат гашения поля (АПШ16) с кольцевой дугогасительной решеткой на напряжение эвакуации ~ 600 В; б) по разработанной методике с использованием ЭВМ и экспериментально исследованы переходные электромагнитные процессы при быстрой эвакуации энергии из основного СПМ системы на АПШ16; разработанная методика расчета на ЭВМ может быть использована и для других сложных СМС с несколькими индуктивно связанными контурами; 3) создана (в 1972 г. - первая в СССР и других странах-участницах ОИЯИ) высоковольтная криогенная установка "Искриз" для исследований электрической прочности электроизоляционных материалов и конструкций в жидком гелии; 4) по результатам исследований, проведенных на установке "Искриз", рекомендованы для применения в конструкциях конкретных СПМ несколько видов моно-

литной и слоистой электроизоляции, а также предложен, создан, испытан и введен в постоянную эксплуатацию высоковольтный (70 кВ) ввод новой конструкции в криостат с жидким гелием; подобные вводы, помимо применения в высоковольтных криогенных испытательных установках, могут использоваться в таких сверхпроводящих устройствах, как индуктивные накопители энергии, энергетические кабели и т.п.

Автор защищает: 1) конструкции и результаты исследований в схемах с различными СПМ нового устройства эвакуации энергии, основанного на использовании шунтированной дугогасительной решетки; 2) методику расчета на ЭВМ переходных электромагнитных и тепловых процессов в сложных СМС с несколькими индуктивно связанными контурами при быстрой эвакуации энергии из них; 3) результаты исследований на высоковольтной криогенной установке "Искриз" поверхностной электрической прочности в жидком гелии моделей проходных изоляторов и созданную с учетом этих результатов конструкцию высоковольтного токоввода в криостат с жидким гелием.

Апробация работы. Основные результаты диссертации обсуждались на НТС в НИКО ЛВЭ (1969-80 гг.), на Всесоюзном семинаре по сверхпроводимости в ИАЭ им.И.В.Курчатова (1970 г.) и на заседании Научного совета АН СССР по комплексной проблеме "Научные основы использования сверхпроводимости в энергетике" (Москва, 1973 г.). Результаты работ, выполненных по теме диссертации, докладывались на VIII Международной конференции социалистических стран по физике и технике низких температур (Дрезден, ГДР, 1969 г.); II, У и VI Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1970; Дубна, 1976 и 1978); VIII Всесоюзном совещании по физике низких температур (Донецк, 1972); III Всесоюзной научно-технической конференции по электромашиностроению (Владимир, 1973); Всесоюзной конференции "Физика диэлектриков и перспективы её развития" (Ленинград, 1973); Межвузовской научно-технической конференции по технической сверхпроводимости (Алушта, 1975); Международном симпозиуме по высоковольтной электроизоляции для низкотемпературных применений (Вроцлав, ПНР, 1976).

Публикации. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в виде четырех описаний изобретений к авторским свидетельствам в бюллетенях СИПОТЗ, в виде статей в журналах *Cryogenics*, ПТЭ, ИТЭ и "Электротехническая промышленность", препринтов и сообщений ОИЯИ, докладов в Трудах указанных выше совещаний и конференций. В основу диссертации положены 13 печатных работ, приведенных в списке литературы.

Структура и объем диссертации определяются избранной темой. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Основной материал диссертации изложен на 150 страницах машинописного текста и иллюстрируется 62 рисунками и 10 таблицами. Библиографический список литературы содержит 129 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение раскрывает актуальность темы, содержит постановку задачи и цели исследований, отражает научную новизну, значимость и практическую ценность основных результатов работы.

В первой обзорной главе приведена классификация сверхпроводящих магнитов физических установок по назначению, режиму работы, методам стабилизации и способу криостатирования обмотки, а также по величине запасенной энергии. Одним из параметров, характеризующих надежность работы СПМ при определенных выбранных устройствах эвакуации, является WJ^2 (W – запасенная энергия, J – плотность тока в проводнике). Такой параметр используется, в частности, в Лоуренсовской лаборатории США (*M.A. Green, Preprint LBL-6747, 1977*). Указана величина этого параметра ($WJ^2 \approx 6 \cdot 10^{23}$ Дж.А²/м⁴), при превышении которой безопасность магнитов с помощью традиционных гасительных сопротивлений не может быть обеспечена без чрезмерного увеличения напряжения эвакуации. Поэтому для таких СПМ целесообразна разработка специальных устройств защиты. Критерием безопасности в данном случае является целостность проводника обмотки СПМ в самой нагретой точке, которой обычно является точка, первой теряющая сверхпроводимость при аварийном переходе магнита в нормальное состояние. С учетом указанного критерия безопасности для защиты крупных СПМ с высокой плотностью тока (до 10^9 А.м⁻²) и параметром $WJ^2 \approx 10^{25}$ Дж.А²/м⁴ в Лоуренсовской лаборатории, например, предлагается применить устройство, обеспечивающее быструю детекцию начала перехода и использующее для поглощения энергии нелинейное (тиристовое) сопротивление в сочетании с алюминиевой трубой, расположенной в непосредственной близости от обмотки, хорошо с ней индуктивно связанной и имеющей криогенную температуру.

Приведены примеры и анализируются основные характерные аварии в СМС, обсуждаются их причины и возможные последствия. Показано, что большинство аварий в СПМ, не обеспеченных криостатической стабилизацией, связано с переходом части сверхпроводника в нормальное состояние. Чрезмерное увеличение температуры отдельных участков обмоток, большие электрические напряжения

в них, резкое увеличение давления в криостате до недопустимых значений – основные опасности при таких переходах. Один из способов избежать или уменьшить объем повреждений при авариях в СПМ – обеспечение эффективной эвакуации из них энергии за пределы криостатов. Это, в особенности, относится к СПМ из проводников с высоким коэффициентом заполнения сверхпроводником. Рассмотрены некоторые особенности процессов в обмотках внутреннестабилизованных СПМ при аварийной эвакуации из них энергии. Предложена система технических параметров, характеризующих работу устройств эвакуации энергии из СПМ. Приведены наиболее распространенные принципиальные электрические схемы эвакуации и кратко характеризуются их основные элементы. Сделан вывод о целесообразности использования для эвакуации энергии из СПМ средних размеров (до ~3 МДж) кольцевых дугогасительных решеток (ДР) серийных автоматов гашения поля (АГП), обеспечивающих вывод энергии при постоянном напряжении на концах обмотки СПМ. Рассмотрены принцип работы и основные достоинства ДР перед другими поглотителями энергии. Использование АГП для эвакуации энергии из СПМ впервые предложено и осуществлено в ЛВЭ ОИЯИ ^{1/1}.

Вторая глава посвящена расчетному и экспериментальному исследованию переходных электромагнитных и тепловых процессов в двух внутреннестабилизованных СПМ различной конструкции при быстрой эвакуации энергии из них с использованием разного типа поглотителей энергии.

В различных режимах эвакуации энергии из СПМ (0,15 кА; 8 Т; 50 кДж; $j_{\text{раб}}$ до $2,3 \cdot 10^8$ А.м⁻²), в том числе в аварийном режиме с превышением критического тока обмотки, сравнивались эффективности эвакуаций на обычное омическое сопротивление и дугогасительную решетку АГП ^{1/2}. Эффективность определялась отношением доли энергии, выделившейся в наружном поглотителе, к полной энергии, запасенной в магните. Обмотка магнита выполнена так, что практически проводник можно считать адиабатически изолированным от жидкого гелия. Кроме того, в обмотке существует несколько зон с одинаково близким к критическому состоянию. На рис. 1А показано, что при одинаковых начальных условиях эффективность эвакуации энергии из данного СПМ на АГП выше, чем на омическое сопротивление. Далее по экспериментальным данным рассчитана температура самой нагретой точки обмотки при использовании обоих типов

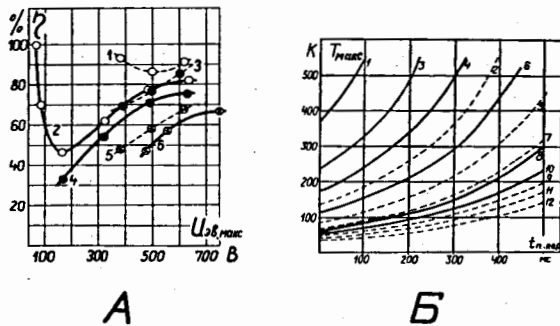


Рис.1. Экспериментальные (А) и расчетные (Б) результаты исследований процессов эвакуации энергии из СММ с высокой плотностью тока [2]. А - зависимость эффективности эвакуации (η) от величины максимального напряжения на концах обмотки магнита для различных энергопоглотителей: 1,2 - начальный ток магнита $J_{\text{мо}} = 120$ А, ручной запуск защиты; 3,4 - автоматический запуск под действием нагревателя в обмотке, $J_{\text{мо}} = 120$ А; 5,6 - автоматический запуск, критический ток (~ 147 А). Б - зависимость наибольших температур обмотки от величины $U_{\text{эв, макс}}$ и времени полного переключения тока в энергопоглотитель: 1,2 - $U_{\text{эв, макс}} = 300$ В; 3-350 В; 4,5 - 400 В; 6,7 - 500 В; 8,9 - 800 В; 10,11 - 1000 В; 12 - 1500 В. Пунктирные кривые - эвакуация на АПТ, сплошные - на омическое сопротивление.

поглотителей энергии и двух различных по быстродействию переключателей тока в режимах с разным по величине напряжением эвакуации. При этом использовалось уравнение теплового баланса при адиабатическом нагреве элементарного объема проводника транспортным током, которое после разделения переменных и интегрирования записывается, как

$$S^2 \gamma \int_{T_k}^T \frac{c_p(T)}{\rho(T)} dT = \int_0^t i^2(t) dt, \text{ где:}$$

$c_p(T)$ - удельная теплоемкость элемента длины проводника;
 $i(t)$ - транспортный ток, начиная с момента появления нормаль-

ной зоны в обмотке; T - температура проводника; t - время;
 $\rho(T)$, γ и S - удельные электрическое сопротивление и вес, а также площадь поперечного сечения проводника. Левая часть уравнения для любого СММ может быть представлена определенной функцией, независимым аргументом которой является температура самой нагретой точки обмотки. Правая часть уравнения характеризует количество выделившегося в обмотке тепла и подсчитывается по экспериментальным кривым изменения тока при эвакуациях энергии, начиная с момента появления нормальной зоны в обмотке. Отметим, что величина правой части уравнения для режимов эвакуации на нелинейное сопротивление или АПТ приблизительно в 1,5 раза меньше, чем при эвакуации на омическое сопротивление. Соответственно уменьшается и температура самой нагретой точки.

На рис.1Б даны расчетные кривые зависимостей значений максимальных температур обмотки рассматриваемого магнита от величин времени полного переключения тока в поглотитель энергии ($t_{\text{п, пер}}$) и максимального значения напряжения эвакуации ($U_{\text{эв, макс}}$) для экспоненциального и линейного характеров снижения тока со значения 120 А. Из этих расчетных кривых следует, что при одинаковых быстродействии переключателя тока и максимальном значении напряжения эвакуации температура обмотки в самой нагретой точке при использовании АПТ меньше, чем при эвакуации на сопротивление.

Исследованы также переходные процессы при быстрой эвакуации энергии из СМС "Кольцетрон" (рис.2) - сверхпроводящей секции коллективного линейного ускорителя [3]. Изложена методика расчета переходных процессов в подобных СМС, особенностью конструкции которых является наличие нескольких индуктивно связанных с основной обмоткой контуров. Соответствующая программа для ЭВМ позволяет определить величины токов, температур нагрева и долей энергии, выделившейся как в обмотке СММ (в случае перехода её в нормальное состояние), так и в отдельных контурах элементов конструкции. Основные из допущений, принятых в программе: мгновенный переход всей обмотки СММ в нормальное состояние, если таковой происходит; отсутствие энергетических потерь в обмотке СММ при эвакуации и теплоотдачи от любого из расчетных контуров в жидкий гелий. Приведены математическое описание процессов и общая схема решения задачи. Алгоритм расчета представляет собой решение системы дифференциальных уравнений для намагничивающих сил расчетных конту-

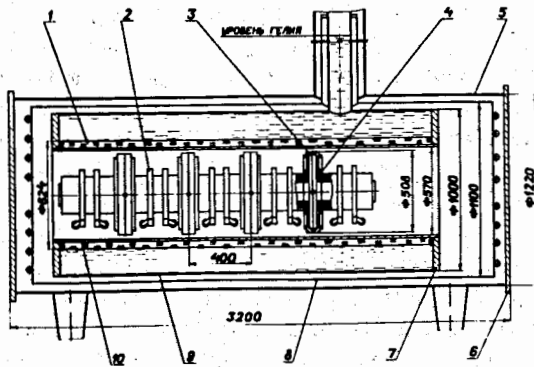


Рис.2. Сверхпроводящая магнитная система "Кольцетрон" с несколькими индуктивно связанными контурами элементов конструкции: 1 - обмотка основного СПМ; 2 - опорные медные пластины; 3,4 - цилиндрическая и боковая части резонаторов из меди высокой чистоты ($\rho_{300K}/\rho_{4,2K} \approx 65$); 5 - вакуумный кожух; 6,7 - крышки вакуумного кожуха и гелиевого криостата основного СПМ; 8 - медный азотный экран; 9,10 - наружная и внутренняя стенки гелиевого криостата.

ров. В уравнениях использованы элементы обратной матрицы определителя, составленного из величин собственных и взаимных индуктивностей этих контуров. Система уравнений решалась методом Рунге-Кутты, при этом определялись изменения намагничивающих сил в каждом контуре на каждом выбранном шаге интегрирования. Затем на каждом шаге по времени рассчитывались сопротивления и теплоёмкости контуров и соответствующие приросты энергии, выделившейся в каждом из них. Наконец, определялись температуры контуров. Такой цикл расчетов многократно повторялся до выделения всей накопленной энергии в наружном поглотителе, обмотке СПМ (при её переходе) и расчетных контурах элементов конструкции.

Указаны основные отличия предложенной программы для ЭВМ от известной методики расчета „Quench“ (M.N.Wilson. Preprint RHEL/M, 1968). Намечены пути усовершенствования предложенной программы.

Расчеты по разработанной методике качественно проверены в экспериментах по быстрой эвакуации энергии из СМС "Кольцетрон"

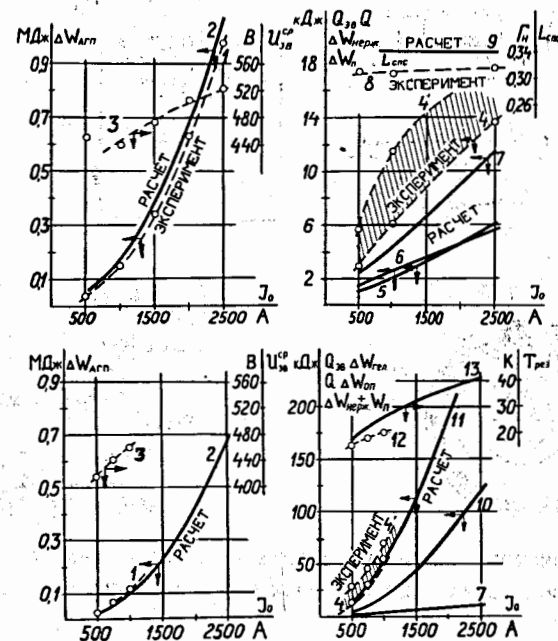


Рис.3. Результаты расчетов и экспериментов по эвакуации энергии на АПШБ из СМС "Кольцетрон" без резонаторно-модульного узла (А) и с тремя резонаторами (Б); 1,2 - энергия, выведенная из криостата; 3 - среднее значение напряжения эвакуации; 4 - полное изменение внутренней энергии гелия (Q) в объеме криостата со стояком за время измерений (~ 2 минуты); 4' - изменение внутренней энергии гелия, обусловленное только эвакуацией ($Q_{эв}$); 5 - тепловыделения в стенках гелиевого криостата; 6 - энергетические потери в обмотке СПМ; 7 - суммарные расчетные тепловыделения, воспринимаемые жидким гелием в криостате СПМ; 8-9 - собственная индуктивность обмотки СПМ; 10 - суммарные тепловыделения в опорных пластинах; 11 - суммарные расчетные тепловыделения, воспринимаемые жидким гелием в криостате СПМ и ваннах резонаторов; 12 - температура резонатора; 13 - расчетный адиабатический нагрев резонатора. Пунктирные кривые - эксперимент, сплошные - расчет.

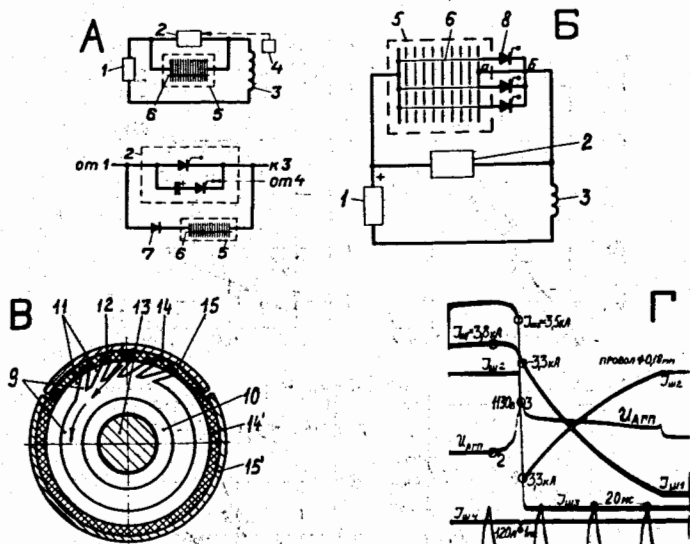


Рис. 4. Устройства эвакуации энергии из СПМ постоянного тока, основанные на использовании шунтированных дугогасительных решеток (ЩДР).
 А - принципиальная электрическая схема устройства с одной плавкой проволокой (6) и быстродействующим переключателем тока (2); внизу - того же устройства с тиристорным переключателем тока: 1 - источник питания; 3 - сверхпроводящий магнит; 4 - датчик перехода; 5 - ЩДР; 7,8 - включающие элементы. Б - то же - с несколькими проволочками и включающими элементами. В - конструкция ЩДР со сменным блоком (поз. 12, 14, 15) плавких проволочек: 9 - медная пластина; 10, 11 - изолирующие прокладки; 12 - плавкая проволочка; 13, 15 и 15' - магнитопровод; 14 и 14' - изоляционный кожух.
 Г - отключение индуктивного накопителя энергии устройством по схеме Б с магнитными разрядниками в качестве включающих элементов: $I_{\Sigma 1}$ - общий ток; $I_{\Sigma 2}$ - ток через ЩДР; $U_{АП}$ - напряжение на выводах переключателя тока (серийный АП130-42); 2 - момент размыкания дугогасительных контактов АП130; 3 - момент загорания устойчивых коротких дуг во всех промежутках ЩДР; $I_{\Sigma 3}$ - ток через переключатель тока; $I_{\Sigma 4}$ - импульс тока через включающий элемент.

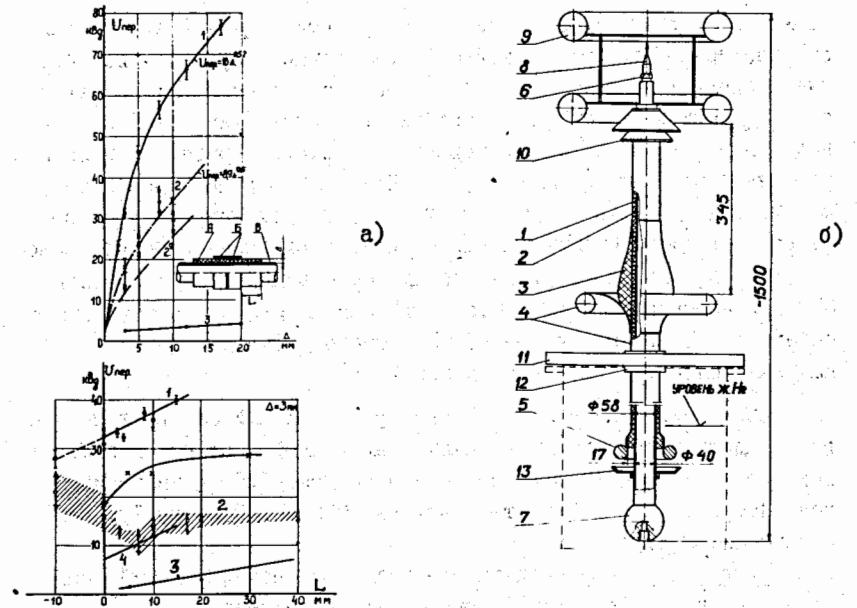


Рис. 5. Результаты исследований поверхностной электрической прочности моделей проходных изоляторов в жидком гелии (а) и выполненная на основе этих результатов новая конструкция высоковольтного токовода в криостат с жидким гелием (б).
 а) - зависимости напряжения перекрытия ($U_{пер}$) от толщины изоляционного остова (Δ) и от расстояния L в разных средах: 1 - жидком азоте; 2 - жидком гелии (2а - минимальные значения); 3 - газообразном гелии (293 К); 4 - воздухе (293 К); крестиком отмечены данные испытаний в трансформаторном масле (45 кВ_г / 2,5 мм). Стрелками дан разброс экспериментальных значений, прямыми черточками - доверительный интервал с коэфф. надежности $\alpha = 0,95$. А - изоляционный остов; Б - заземленная втулка; В - токоведущий стержень.
 б) - 1 - токоведущий стержень; 2 - основной изоляционный остов из липкой стеклолакоткани на основе полиимидного связующего; 3 - съемная часть изоляционного остова; 4 и 5 - "теплый" и "холодный" концы заземленной оболочки; 6, 7 - высоковольтные зажим и электрод; 8 - выход охлаждающего гелия; 9 - высоковольтный экран; 10 - влагозащитный козырек; 11 - крышка криостата; 12 - скользящее уплотнение; 13 - газотойный козырек.

на АПГ с несерийной дугогасительной решеткой. Такой АПГ создан специально для защиты данной СМС. Некоторые результаты исследований приведены на рис.3, где показаны в зависимости от начального тока J_0 доли энергий, выведенной из криостата (кривые I и 2) и выделившейся в контурах из нержавеющей стали (кривая 5) и из меди различной чистоты (кривые IO, II). Кривая 8 отражает особенность магнитного поведения обмотки СПМ системы "Кольцетрон", которое в целом определяется диамагнетизмом сверхпроводящей обмотки, более заметным в меньших магнитных полях: собственная индуктивность СПМ при изменении тока от 0,5 кА до 2,5 кА несколько возрастала, оставаясь все время меньше её расчетного значения, определенного как для обычной несверхпроводящей катушки.

Представленный в главе 2 экспериментальный материал доказывает надежную работу АПГ в режимах аварийной и плановой эвакуации энергии из СПМ. Всего осуществлено свыше 200 коммутаций токов (от 40 до 3000 А) шести различных СПМ (от 0,05 до 1,1 МДж) с помощью АПГ трех типов.

В третьей главе представлен ряд технических решений, направленных на усовершенствование серийных автоматов гашения поля для использования их в схемах защиты сверхпроводящих магнитов. Предложенные и реализованные в виде опытных образцов устройства испытаны в схемах с индуктивными накопителями энергии и СПМ в режимах аварийной и плановой эвакуации энергии. Показано, что использование этих устройств в схемах защиты СПМ позволяет значительно уменьшить время $t_{п.пер.}$ увеличить максимальные энергоемкость и напряжение эвакуации ($U_{эв}$), достижимые в единичном устройстве на основе дугогасительной решетки АПГ. Кроме этого, может быть обеспечен автоматический выбор величины $U_{эв}$ в зависимости от вида аварии в СМС.

Показано, что использование нового индукционно-динамического привода (ИДП) приводит к уменьшению собственного времени отключения АПГ со 100-150 мс до 5 мс. Дальнейшее уменьшение $t_{п.пер.}$ достигалось за счет использования быстродействующего бесконтактного переключателя тока в сочетании с шунтированной дугогасительной решеткой (ЩДР). В последнем случае электрическая дуга сразу после срабатывания переключателя тока инициировалась непосредственно во всех промежутках решетки с помощью плавкой проволоочки, проходящей сквозь её пластины (рис.4). Предложенные

устройства защищены четырьмя положительными решениями по заявкам на изобретения и тремя авторскими свидетельствами /4,5,6/.

В экспериментах с двумя различными СПМ доказана работоспособность устройств с ЩДР и сделан выбор наиболее надежно работающих выключающих элементов (поз.8 на рис.4). При испытаниях с СПМ (220 кДж) одного из предложенных устройств, состоящего из сверхпроводящего переключателя тока (СПТ) и ЩДР с плавкой проволокой, достигнуто время от подачи управляющего импульса на отключение СПТ до появления устойчивой электрической дуги в решетке ~ 2 мс /7/. В другой серии экспериментов в схеме с СПМ (80 кДж) и ЩДР с несколькими проволочками и диносторами в качестве выключающих

элементов получено время от срабатывания датчика перехода обмотки в нормальное состояние до момента загорания дуги во всех промежутках ЩДР около 10 мс. В качестве переключателя тока здесь был использован серийный АПГ30 с ИДП.

Предложенные устройства эвакуации могут быть использованы для защиты крупных индуктивных накопителей энергии, а также для гашения поля синхронных электрических машин большой мощности.

Четвертая глава посвящена вопросам, связанным с разработкой электроизоляционных конструкций (ЭИК) сверхпроводящих устройств. Анализируются воздействия отдельных факторов на электрическую изоляцию СПМ физических установок /8/. Рассмотрены методы испытаний электроизоляционных материалов (ЭИМ) в криогенных условиях и предложена одна из возможных последовательностей их проведения при выборе ЭИМ для сверхпроводящих устройств /9/. Дан краткий обзор свойств криогенных жидкостей и газов, а также различных видов твердой изоляции, работающей при криогенных температурах.

Описана созданная в ЛВЭ ОИЯИ установка "Искриз" ($U_{ном} = 90$ кВ) с гелиевым криостатом $\varnothing 300$ мм /10/, высоковольтными вводами и испытательными ячейками для определения электрической прочности в жидком гелии одновременно нескольких образцов пленочной и монолитной изоляции или моделей различных ЭИК. Представлены результаты испытаний в криогенных средах кратковременной электрической прочности ряда полимерных материалов (пленок ПИ, ПЭФ, ПТФЭ), кабельной бумаги, образцов монолитной изоляции из эпоксидных компаундов и ситаллов, комбинированных материалов, а также различного вида ЭИК /10, II/.

Впервые проведены исследования процессов электрического старения под действием частичных разрядов образцов слоистой электроизоляции, пропитанной жидким гелием. Получены соответствующие "кривые жизни" для образцов с лавсановой и фторопластовой пленками - с целью разработки методики определения допустимого уровня напряженности электрического поля при заданном сроке службы данного ЭИМ /10, 11/.

При исследованиях электрической прочности моделей проходных изоляторов (рис.5А) выявлена особенность перекрытия по поверхности диэлектрика в жидком гелии /12/. С учетом результатов этих исследований предложена и реализована новая конструкция (рис.5Б) высоковольтного (до 70 кВ) токоввода в криостат с жидким гелием /13/.

В Заключении приводятся основные итоги диссертационной работы:

1. Сформулированы общие рекомендации по выполнению устройств защиты СПМ постоянного тока. Одним из параметров, характеризующих надежность СПМ при определенных выбранных устройствах эвакуации энергии, является WJ^2 (W - запасенная энергия, J - плотность тока в проводнике). При $WJ^2 \geq 6 \cdot 10^{23}$ Дж.А²/м⁴ безопасность СПМ с помощью традиционных гасительных сопротивлений не может быть обеспечена без увеличения напряжения эвакуации ($U_{эв}$) свыше 1 кВ. В этих случаях целесообразна разработка специальных устройств защиты, основанных, например, на использовании дутогасительных решеток АП, обеспечивающих режим эвакуации с $U_{эв} \approx Const$.

2. Проведены исследования по эффективности эвакуации энергии из двух внутреннестабилизированных СПМ с использованием разного типа поглотителей энергии. Показано, что при одинаковых начальных условиях эффективность аварийной эвакуации на решетку АП выше, а максимальная температура обмотки ниже, чем при использовании омического сопротивления.

3. В экспериментах (свыше 200 коммутаций токов от 40 А до 3000 А) по аварийной и плановой эвакуации энергии из шести различных СПМ (0,05-1,1 МДж) доказана надежная и эффективная работа серийных АП трех разных типов.

4. Создан, испытан и введен в эксплуатацию на сложной сверхпроводящей магнитной системе (секции коллективного линейного ускорителя "Кольцетрон" Отдела новых методов ускорения ОИЯИ) автомат гашения поля АП6 с несерийной дутогасительной решеткой ($U_{эв} \leq 600$ В).

5. Предложен ряд технических решений, направленных на усовершенствование серийных АП для использования их в схемах защиты СПМ. Исследована работа АП с новым быстродействующим индукционно-динамическим приводом контактной системы, что позволило уменьшить собственное время отключения автомата со 100-150 мс до 5 мс.

Предложен и опробован на опытных образцах способ инициирования электрической дуги непосредственно в промежутках дутогасительной решетки АП с помощью шунтирующих плавких проволочек. Это существенно уменьшило время переключения тока в поглотитель энергии и, соответственно, увеличило эффективность работы устройства. Например, в схеме с СПМ (220 кДж) испытано новое устройство, состоящее из сверхпроводящего переключателя тока (СПТ) и шунтированной плавкой проволочкой дутогасительной решетки. Достигнуто время от подачи управляющего импульса на отключение СПТ до появления устойчивой электрической дуги в решетке около 2 мс.

Одно из устройств, содержащее ШДР с несколькими проволочками и включающими элементами, успешно испытано и введено в эксплуатацию на стенде Научно-исследовательского криогенного отдела для обеспечения защиты СПМ (до 3 кА; 2 МДж) при авариях.

6. Разработана методика и соответствующая программа для ЭВМ по расчету переходных электромагнитных и тепловых процессов в сложных сверхпроводящих магнитных системах с несколькими индуктивно связанными контурами при эвакуации из них энергии. Показано, например, что при быстрой эвакуации энергии ($J_0 = 2,5$ кА; $U_{эв} = 560$ В $\approx Const$) из СМС "Кольцетрон" на АП6 тепловыделение в стенках гелиевого криостата ($\varnothing_{нар} = 1$ м, длина $\sim 2,3$ м) не превышает 10-15 кДж, а в каждом из медных массивных резонаторов (~ 50 кг; 4,2 К) достигает ~ 90 кДж. Эти расчетные данные качественно подтверждены экспериментом.

7. Создана высоковольтная криогенная установка "Искриз" ($U_{ном} = 90$ кВ) для исследований электрической прочности и предпробойных явлений в электроизоляционных материалах и конструкциях в жидких азоте и гелии.

Испитана в жидком гелии электрическая прочность изоляции нескольких видов сверхпроводящего кабеля, различных полимерных пленочных материалов, монолитных образцов из эпоксидных компаундов и ситаллов. По результатам испытаний рекомендованы к приме-

нению и использованы в конструкциях СПМ следующие материалы: лавсановая пленка (50 мкм) - в СПМ установки "Крион", липкая стеклолакоткань на основе полиимидного связующего - в СПМ "Крот" (1,5 кА; 80 кДж), эпоксидный компаунд на основе смолы ЭД20 с отвердителем марки ПЭПА и наполнителем в виде порошка нитрида бора - в модели сверхпроводящего выключателя.

8. Впервые проведены исследования интенсивности частичных разрядов в слоистой изоляции, пропитанной жидким гелием, и получена соответствующая "кривая жизни" для лавсановой изоляции при испытаниях её длительной электрической прочности.

9. По результатам исследований поверхностной электрической прочности моделей проходных изоляторов в жидком гелии разработан, испытан и введен в эксплуатацию высоковольтный ($U_{ном} = 70$ кВ) ввод новой конструкции в криостат с жидким гелием.

СПИСОК РАБОТ, ПОЛОЖЕННЫХ В ОСНОВУ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Анищенко Н.Г., Васильев В.А., Волков В.Я., Зельдович А.Г., Зельдович Н.К., Крылов В.В., Приходько Д.В., Шишов Ю.А. Сверхпроводящая магнитная система с соленоидом внутренним диаметром 35 см. - Сообщение ОИЯИ, 8-4882, Дубна, 1969.
2. Анищенко Н.Г., Кабат Д., Людemann Р., Менке Х., Цвинева Г.П., Шишов Ю.А. Исследование некоторых вопросов эвакуации энергии из внутреннестабилизованных сверхпроводящих магнитов. - В кн.: Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна: изд.ОИЯИ, 1979, т.1, с.162-165.
3. Агеев А.И., Анищенко Н.Г., Балалыкин Н.И., Баланчиков Н.И., Бекетов В.В., Белушкина А.А., Бычков Н.С., Волков В.Я., Данилов В.В., Житников Б.З., Зельдович А.Г., Зельдович Н.К., Зиновьева Л.Л., Катрасев В.В., Крылов В.В., Лачинов В.М., Лурье С.И., Матвеев Э.В., Менке Х., Муратов Ю.В., Рубин Н.Б., Саранцев В.П., Смирнов Ю.И., Цвинева Г.П., Шабратов В.Г., Шишов Ю.А. Сверхпроводящие и криогенные устройства ускоряющей секции коллективного ускорителя. - Препринт ОИЯИ, 9-9363, Дубна, 1975. Журнал технической физики, 1977, т.47, вып.6, с.1213-1221.
4. Анищенко Н.Г., Шишов Ю.А. Устройство для эвакуации энергии из магнитной системы. - Авторское свид.СССР № 523477, кл. Н 02 Н 3/02 от 17.УШ.73 г. Бюлл. ОИПОТЗ, 1979, № 8, с.240.
5. Анищенко Н.Г., Образцов В.А., Хорев И.А., Шишов Ю.А. Устройство для эвакуации энергии из магнитной системы. - Авторское

свид.СССР № 690583, кл.Н 02 Н 3/02 от 7.УП.76 г. Бюлл.ОИПОТЗ, 1979, № 37, с.238.

6. Анищенко Н.Г., Волков В.Я., Образцов В.А., Хорев И.А., Шишов Ю.А. Устройство для эвакуации энергии из обмоток магнитных систем. - Авторское свид.СССР № 637907, кл.Н 02 Н 7/00 от 11.У.77 г., Бюлл.ОИПОТЗ, 1978, № 46, с.169.
7. Анищенко Н.Г., Менке Х., Шишов Ю.А. Усовершенствование и исследования устройств на основе автоматов гашения поля для эвакуации энергии из сверхпроводящих магнитных систем. - Препринт ОИЯИ, 9-10006, Дубна, 1976. В кн.: Труды У Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., изд. "Наука", 1978, т.П, с.67-70.
8. Анищенко Н.Г., Минеин В.Ф. Проблемы электрической изоляции криогенных и сверхпроводящих электротехнических устройств. - Сб. "Электротехническая промышленность" (раздел "Электро-изоляционные материалы"), 1974, № 1 (42), с.21-24.
9. Анищенко Н.Г., Яворский Э. Выбор электроизоляционных материалов для криогенных и сверхпроводящих устройств и исследования их физических свойств. - Сообщение ОИЯИ, Р8-7663, Дубна, 1974.
10. Анищенко Н.Г., Минеин В.Ф. Исследования кратковременной электрической прочности и сроков службы лавсановой изоляции в криогенных условиях. - Препринт ОИЯИ, Р8-6987, Дубна, 1973. ПТЗ, 1973, № 6, с.176-179. Cryogenics, 1974, Vol. 14, № 7, p.409-410.
11. Анищенко Н.Г., Долбилова Г.И., Шишов Ю.А. Исследование некоторых электроизоляционных материалов и конструкций, применяемых в сверхпроводящих магнитах физики высоких энергий. - Препринт ОИЯИ, 9-10107, Дубна, 1976.
12. Минеин В.Ф., Анищенко Н.Г. Электрический разряд вдоль поверхности проходных изоляторов в жидком гелии. - Препринт ОИЯИ, Р8-8592, Дубна, 1975. Журнал технической физики, 1976, № 11, с.2432-2435. В кн.: Сверхпроводимость. Труды конференции по техническому использованию сверхпроводимости. М., Атомиздат, 1977, т.Ш, с.183-186.
13. Анищенко Н.Г., Минеин В.Ф. Высоковольтное криогенное устройство. - Авторское свид.СССР № 521610, кл.Н 01 В 17/26 от 6.Х1.1974. Бюлл.ОИПОТЗ, 1976, № 26, с.153.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 апреля 1980 года.