



объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

3640 / 2-80

У/8-80

8-80-344

Н.Г.Анищенко, В.Я.Волков, В.И.Дацков,
Д.Кабат, Ю.А.Шишов

ЗАЩИТА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ
ШУНТИРОВАННОЙ КОЛЬЦЕВОЙ
ДУГОГАСИТЕЛЬНОЙ РЕШЕТКИ

Направлено в "Электротехнический обзор" /ЧССР/

1980

1. ВВЕДЕНИЕ

Общей тенденцией при проектировании сверхпроводящих магнитных систем /СМС/ средней величины /до ~10 МДж/ является повышение средней плотности тока J_{cp} в их обмотках. Рост J_{cp} позволяет не только улучшать технические параметры систем, но и снижать их стоимость благодаря уменьшению расходов сверхпроводника. Повышение J_{cp} достигается как за счет уменьшения количества меди в сверхпроводнике, деления обмотки сверхпроводящего магнита /СМ/ на секции с целью более эффективного использования сверхпроводника в соответствии с зависимостью его критического тока и локальным значением индукции магнитного поля в обмотке ^{/1/}, так и за счет плотного выполнения обмотки /без каналов для охлаждения ее жидким гелием/. Таким образом, условия охлаждения обмоток СМ все более приближаются к адиабатическим.

При аварийном переходе СМ нормальная зона, появившаяся в одной или сразу нескольких точках обмотки, распространяется вдоль проводника со скоростью в несколько десятков метров в секунду или более ^{/2/}. Распространение нормальной зоны в плотно выполненных обмотках СМ с высокой J_{cp} носит трехмерный характер. Участки обмотки с нормальной зоной нагреваются транспортным током, который после подключения поглотителя энергии устройства эвакуации запасенной в СМ энергии начинает быстро уменьшаться. Под действием соответствующего изменения магнитного поля в сверхпроводнике возникают потери, что приводит к дополнительному нагреву всей обмотки. В некоторых местах обмотки это может привести к превышению температуры перехода сверхпроводника в нормальное состояние $T_c(J, B)$, что вызовет появление новых участков с нормальной зоной, в которых транспортный ток создает дополнительные тепловыделения.

Для того, чтобы при аварийном переходе СМ в нормальное состояние защитить обмотку от чрезмерного нагрева и высоких внутренних электрических напряжений и достигнуть при этом максимальной эффективности эвакуации, надо обеспечить достаточные быстродействие устройства защиты и скорость снижения транспортного тока.

Целью настоящей работы является испытание кольцевой дугогасительной решетки, шунтированной плавкой провололочкой. Решетка служит поглотителем энергии в устройстве эвакуации, снабженном переключателем тока с быстродействующим приводом контактов.



2. УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ СМ

Устройство защиты СМ должно обеспечить:

- индикацию начала перехода обмотки СМ в нормальное состояние;
- быстрое переключение тока СМ в цепь поглотителя энергии;
- эффективную эвакуацию запасенной в СМ энергии.

В соответствии с этими требованиями устройство защиты СМ должно состоять из трех основных частей:

- 1/ детектора возникновения нормальной зоны в обмотке СМ,
- 2/ переключателя тока,
- 3/ поглотителя энергии.

2.1. Индикация возникновения нормальной зоны

Из различных методов обнаружения нормальной зоны нами применена наиболее распространенная схема "мостика" /3.4/. В наших экспериментах она выполнена со вспомогательной катушкой и делителем напряжения. Сигналы, величина которых прямо пропорциональна омическому сопротивлению в обмотке магнита, с диагонали моста подаются на электронный блок /поз.5 на рис.2/, где после усиления производится селекция их по амплитуде и длительности - для отстройки от скачков магнитного потока в сверхпроводнике. Детектор срабатывает и подает сигнал на переключатель тока при превышении определенных регулируемых порогов в пределах 50-500 мВ и 0,5-12 мс. Нами использован электронный блок прибора - эвакуатор энергии из СМ типа VME-200 производства объединения "Братиславские электротехнические заводы" /г.Братислава, ЧССР/ /5/. В экспериментах детектор был настроен на уровни 100 мВ и 10 мс.

2.2. Переключатель тока

Быстродействующими переключателями тока могут служить, например, серийные выключатели, у которых обычный электромагнитный привод заменен индукционно-динамическим приводом /ИДП/ контактов /6/ /собственное время отключения контактов составляет 5-6 мс/, тиристорные или сверхпроводящие /7/ переключатели, которые позволяют уменьшить время переключения тока до 0,5 мс и менее. Сверхпроводящие переключатели являются наиболее быстродействующими, однако они могут только ограничивать ток, не прерывая его полностью, т.к. в нормальном состоянии их сопротивление имеет конечную величину. При помощи сверхпроводящего переключателя можно обеспечить эвакуацию энергии из СМ, работающих в режиме "замороженного тока" /8/.

Для некоторых СМ, частично или полностью стабилизированных большим количеством меди в сверхпроводнике, нет необходимости в высоком быстродействии переключателя тока, однако оно в любом случае "не вредно".

В качестве переключателя тока нами использована контактная система автомата гашения поля /АГП/ /9/ с ИДП /позиции 7 и 6 на рис.2/.

2.3. Поглотитель энергии

Поглотителями энергии в устройствах эвакуации могут служить линейные и нелинейные резисторы, предварительно заряженные конденсаторы большой емкости, дугогасительная решетка и др. Как правило, наиболее эффективно аварийный вывод энергии из СМ происходит при линейном снижении тока и соответственно постоянном напряжении U_v на концах обмотки в течение всего процесса эвакуации. При этом величина U_v - константа выбирается максимально допустимой и определяется в основном электрической прочностью изоляции магнита.

В связи с решением проблемы гашения магнитного поля крупных синхронных генераторов были проведены исследования, результатом которых явилось создание автоматов гашения поля /АГП/ с кольцевой дугогасительной решеткой. Работа АГП основана на свойстве короткой /2-3 мм/ дуги сохранять почти неизменным падение напряжения /25-30 В/ в широком диапазоне изменения тока /от малой величины до 24 кА/. Напряжение на всей дугогасительной решетке является суммой напряжений на отдельных ее промежутках, и, таким образом, можно подобрать нужное напряжение, при котором должна происходить эвакуация энергии. Решетка представляет собой набор медных пластин толщиной 1,5-2 мм, между которыми находятся кольца из фибры толщиной -1,5 мм. Поперечное сечение решетки изображено на рис.3. В проведенных нами экспериментах применена дугогасительная решетка /поз.10 на рис.2/, которая с целью повышения быстродействия переключения тока шунтирована тонкой медной проволокой /10/. В шунтированной дугогасительной решетке /ШДР/ электрическая дуга индуцируется непосредственно в промежутках решетки. Время нагрева до температуры плавления в ШДР должно быть больше времени расхождения дугогасительных контактов АГП. В противном случае могут происходить повторные зажигания дуги между неполностью разошедшимися контактами автомата. В случае применения тиристорного или сверхпроводящего переключателя тока сечение проволоки в ШДР может быть меньше и время входа дуги в решетку соответственно можно сократить. Чтобы уменьшить величину перенапряжения в момент погасания дуги в решет-

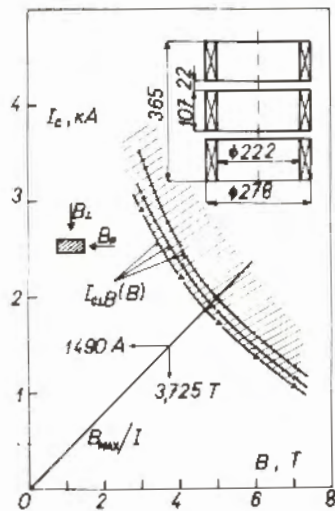


Рис.1. Зависимости критического тока сверхпроводящей шины от индукции магнитного поля, направленного перпендикулярно к более широкой /3,5 мм/ стороне шины, - $I_{c\perp}(B)$. Область ожидаемых зависимостей $I_{c\parallel}(B)$ заштрихована. На характеристике B_{max}/I сверхпроводящего соленоида /геометрия обмотки которого приведена в верхнем правом углу рисунка/ указана критическая точка: $I_{CM} = 1490$ А, $B_{CMAX} = 3,725$ Т.

ке, к некоторым ее пластинам подключены шунтирующие сопротивления, создающие определенную последовательность погасания коротких дуг в ее промежутках.

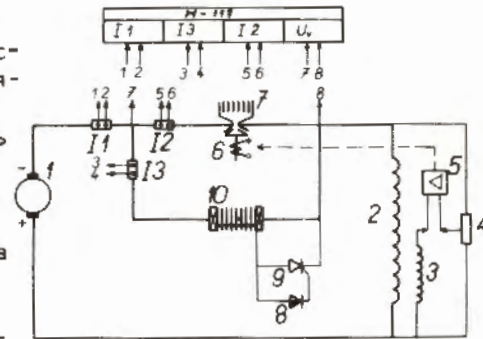
Сокращение длительности процесса эвакуации важно как для повышения эффективности эвакуации, так и для ограничения максимальной температуры в обмотке СМ /11/. Использование АГП /12/, а также ЩДР и переключателей тока с ИДП /7/ для эвакуации энергии из СМ было впервые предложено и реализовано в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. В дальнейшем были проведены работы по усовершенствованию АГП, предназначенных для защиты СМ /13/.

3. ОПИСАНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО МАГНИТА

Сверхпроводящий магнит, на котором проводились эксперименты, имеет форму соленоида и состоит из трех секций, расположенных друг над другом. Их внутренний диаметр - 222 мм, наружный - 278 мм. Высота одной секции - 107 мм, промежуток между секциями - 22 мм. Полная высота магнита - 365 мм /рис.1/.

Магнит намотан из сверхпроводящей шины сечением $3,5 \times 2,0$ мм², содержащей 361 жилу из сплава NbTi-50. Коэффициент заполнения шины сверхпроводником составляет ~26%. Она изолирована стеклотканью на основе полиимидного связующего толщиной 0,11 мм, на которую нанесен клеящий состав. После полимеризации изоляция была проверена на электрическую прочность 25 кВ. Жилы из NbTi в шине имеют форму, близкую к эллиптической, с отношением большей и меньшей осей в диапазоне 1,2÷1,6. В соответствии с формой жил наблюдается анизотропия критического тока в зависимости от направления магнитного поля: перпендикулярного или параллельного широкой /3,5 мм/ стороне шины /14/. Коэффициент ани-

Рис.2. Электрическая схема испытательного стенда. 1 - источник тока, 2 - сверхпроводящий соленоид, 3 - вспомогательная катушка, 4 - делитель напряжения, 5 - электронный блок для усиления и селекции сигналов, 6 - индукционно-динамический привод контактов АГП, 7 - контактная система АГП, 8 - динистор, 9 - тиристор, 10 - кольцевая шунтирующая дугогасительная решетка.



зотропии $I_{c\parallel}(B)/I_{c\perp}(B)$ лежит в пределах 1,2÷1,6. Характеристики шин $I_{c\perp}(B)$ приведены на рис.1. На этом рисунке штриховкой обозначена область ожидаемых характеристик $I_{c\parallel}(B)$.

Измеренный для СМ из данной шины критический ток магнита $I_{CM} = 1490$ А дает среднюю критическую плотность тока в обмотке $1,4 \cdot 10^8$ А/м². Расчетная индуктивность обмотки составляет 0,1 Гн, запасенная энергия при I_{CM} равна ~100 кДж. Характеристика $B_{max}/I = 1,1$ В₀/I приведена на рис.1.

Магнит специально спроектирован так, чтобы его параметры были близки к параметрам дублета квадрупольных магнитов, изготовленного на предприятии "Шкода" /г.Пльзень, ЧССР/ для Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Таким образом, описанная СМС является по основным параметрам /ток, поле, запасенная энергия, сверхпроводник/ моделью квадрупольных магнитов. На ней можно проводить исследовательские работы по аварийной эвакуации запасенной энергии, по работе в режиме "замороженного тока" и др.

4. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В данных экспериментах выработана методика подбора шунтирующих проволочек оптимального сечения. Критерием выбора сечения проволочек было достижение минимального времени переключения тока в ЩДР.

Электрическая схема испытательного стенда приведена на рис.2. Источником тока /1/ является мотор-генератор типа АНГ:72100/5000 А;12/6 В. Сигнал с ВМЕ-200 подавался на ИДП /6/ контактов АГП /7/. При размыкании контактов переключателя тока /АГП 30-41: 3,2 кА; 1200 В/ на них возникает дуга, которая под действием магнитного дутья растягивается, за счет че-

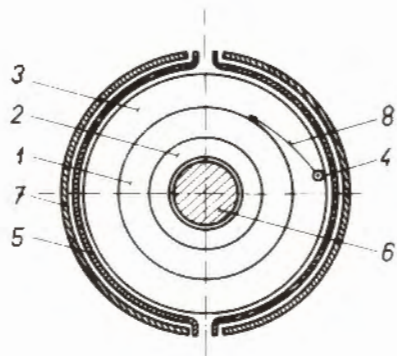


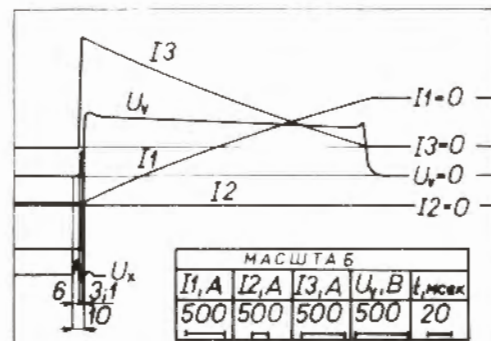
Рис. 3. Поперечное сечение кольцевой дугогасительной решетки, шунтированной одной плавкой проволокой. 1 - медная кольцеобразная пластина; 2, 3 - изолирующие прокладки; 4 - плавкая проволока; 5 - наружная изоляционная оболочка; 6 - стержневой изолированный магнитопровод; 7 - наружный листовой магнитопровод; 8 - направление движения осей коротких дуг.

го напряжение на ней повышается. Как только это напряжение достигает определенной величины /~100 В/, срабатывает динистор типа КН 102 Б/8/, который управляет тиристором ВКДУ-150/9/. В момент открытия тиристора на ШДР /10/ с проволокой попадает напряжение дуги. Проволочка при сгорании обеспечивает возникновение дуги в промежутках ШДР. Сечение проволоочки должно быть таким, чтобы, с одной стороны, обеспечить переключение тока в цепь с ШДР за минимальное время, а с другой - дать возможность погаснуть дуге на контактах переключателя тока. Запись измеряемых величин проводилась на светолучевом шлейфовом осциллографе типа Н-117. В процессе эвакуации энергии регистрировались: управляющий импульс от блока детекции нормальной зоны в обмотке СМ /блок 5 на рис. 2/, подаваемый на ИДП контактов АГП; напряжения на контактах переключателя /напряжение эвакуации U_v /; токи через переключатель (I_2), ШДР (I_3) и общий ток (I_1). Запись перечисленных выше величин проводилась со скоростью движения ленты осциллографа /1000 мм/с/, что позволяет различать записываемые величины с точностью не хуже 0,1 мс по времени. Эффективность эвакуации определялась графическим интегрированием произведения напряжения и тока ШДР по времени. Напряжение эвакуации /~600 В/ определялось количеством /16/ промежутков данной ШДР.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные нами эксперименты показали, что по сравнению с серийно выпускаемыми АГП предлагаемое устройство эвакуации позволяет уменьшить время от подачи импульса на отключение привода до загорания дуги во всех промежутках решетки /достижения полного напряжения эвакуации/ со ~180 мс до ~10 мс. Такое быстрое действие уже вполне достаточно для целого ряда СМ. В частности, для СМ, на котором проводились эк-

Рис. 4. Запись напряжения эвакуации U_v тока, текущего через АГП (I2), шунтированную дугогасительную решетку (I3); общего тока (I1) в течение полного процесса эвакуации энергии. Масштабы приведены на рисунке. Сигнал, управляющий ПДП контактов АГП, - U_x . Полное время переключения тока ~10 мс.



сперименты, использование предлагаемого устройства эвакуации дало вполне удовлетворительные результаты. На рис. 4 приведена одна из осциллограмм, снятая при начальном токе в обмотке 1320 А. Перевод обмотки магнита в нормальное состояние осуществляется с помощью нагревателя. Напряжение эвакуации $U_v = 600-475$ В, диаметр шунтирующей медной проволоочки - 0,51 мм. Из рис. 4 следует, что время подъема напряжения на контактах переключателя тока и сгорания медной проволоочки в ШДР /время "перехвата" тока/ ~3 мс и время подъема напряжения на ШДР до напряжения эвакуации ~1 мс. При этом эффективность эвакуации составила ~98%. Рассчитанная по методике, описанной в [1], максимальная температура в обмотке достигала ~22 К. Надо отметить, что селекция сигнала в диагонали моста настроена на пороги срабатывания 100 мВ и 10 мс. При СМ с более высокой средней плотностью тока, где можно ожидать более высокой скорости нарастания сопротивления в обмотке при переходе ее в нормальное состояние, эти пороги могут быть соответственно уменьшены. Кроме того, быстрое действие устройств эвакуации энергии с применением ШДР может быть повышено до уровня ~1 мс, если применить быстродействующий бесконтактный переключатель тока, например тиристорный или сверхпроводящий [10, 7].

6. ВЫВОДЫ

1. Для исследования вопросов защиты создаваемого в ЧССР дублета квадрупольных магнитов в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ изготовлен сверхпроводящий соленоид, параметры которого близки к параметрам магнитов дублета.

2. Для контактной системы автомата гашения поля /АГП/, использованного в качестве переключателя тока, применен индук-

ционно-динамический привод /ИДП/, с помощью которого достигнуто собственное время отключения автомата, равное 5-6 мс.

3. В качестве поглотителя энергии применена дугогасительная решетка, которая с целью повышения быстродействия переключения тока шунтирована плавкой медной проволокой. Это позволяет снизить время переключения тока за счет инициирования дуги непосредственно в промежутках решетки.

4. Создано и испытано устройство защиты сверхпроводящих магнитов СМ с применением АГП, снабженного быстродействующим ИДП, и шунтированной дугогасительной решетки /ШДР/. Время полного переключения тока в ШДР составляет ~10 мс. Эффективность эвакуации запасенной в СМ энергии при ~600 В равна 98%. Максимальная расчетная температура в обмотке СМ при эвакуации достигала ~22 К.

Проведенные эксперименты показали высокую надежность и эффективность использования предлагаемого устройства в схемах защиты СМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kabat D., Sisov J.A., Lysenko J.N. Cs. cas. pro fyziku, Sekce A, 1977, Svazek "A,27", str.587-594.
2. Карасик В.Р. и др. Препринт ФИАН, 1974, №112.
3. Agureev V.N. et al. Cryogenic, 1969, vol.9, No.1, p.26-31.
4. Cesnak L., Kokavec J. Cryogenics, 1972, vol.12, No.2, p.116-120.
5. Hora J., Lipsky V. Transformatory, 1979, 15, p.5-9.
6. Блудов А.И., Еленкин А.М., Ивашин В.В. ПТЭ, 1973, №4, с.241.
7. Анищенко Н.Г., Менке Х., Шишов Ю.А. Препринт ОИЯИ, 9-10006, Дубна, 1976.
8. Kabat D. et al. Cryogenics, 1979, vol.19, No.7, pp.382-384.
9. Брон О.Б. Автоматы гашения магнитного поля. Госэнергоиздат, М., 1961.
10. Анищенко Н.Г., Шишов Ю.А. Авт.свид. СССР, №523447, кл. Н 02НЗ/02 от 17.08.73 г. Бюлл. ОИПОТЗ, 1979, №8, с.240..
11. Анищенко Н.Т. и др. ОИЯИ, 8-12185, Дубна, 1979.
12. Анищенко Н.Г. и др. ОИЯИ, 8-4882, Дубна, 1969.
13. Анищенко Н.Г. и др. ОИЯИ, 9-80-287, Дубна, 1980.
14. Best K.J. et al. IEEE Transaction on Magnetics, vol. MAG-15, No.1, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 мая 1980 года.