

4992/2-76

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



A-676

13/хн-76

9 - 10006

Н.Г.Анищенко, Х.Менке, Ю.А.Шишов

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЯ
УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ АВТОМАТОВ ГАШЕНИЯ ПОЛЯ
ДЛЯ ЭВАКУАЦИИ ЭНЕРГИИ
ИЗ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

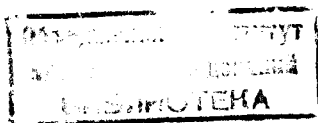
1976

9 - 10006

Н.Г.Анищенко, Х.Менке, Ю.А.Шишов

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЯ
УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ АВТОМАТОВ ГАШЕНИЯ ПОЛЯ
ДЛЯ ЭВАКУАЦИИ ЭНЕРГИИ
ИЗ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Направлено на V Всесоюзное совещание по ускорителям
заряженных частиц (Дубна, 1976)



В настоящее время в ускорительной технике и электроэнергетике все шире применяются крупные сверхпроводящие магнитные системы /СПМС/, обмотки которых выполнены из внутренне-стабилизированных сверхпроводников с малым количеством нормального металла. Как правило, такие обмотки замоноличиваются и отличаются высокой плотностью тока и большим запасом энергии / > 1 МДж/. Ниже будут рассмотрены вопросы безопасности этих обмоток.

Аварийные ситуации, возникающие в СПМС по различным причинам, обычно сопровождаются быстрым распространением нормальной зоны. Это может привести к недопустимому разогреву сверхпроводника, значительному испарению жидкого гелия /и соответствующему повышению давления в криостате/, а также к появлению перенапряжений, опасных для электрической изоляции обмоток. Поэтому обеспечение рассматриваемых СПМС надежными устройствами защиты, осуществляющими при авариях эвакуацию накопленной энергии из обмоток /и из объема с жидким гелием/ в наружные устройства, является весьма актуальной задачей.

Практически любое устройство эвакуации энергии из СПМС можно представить состоящим из датчика начала перехода части обмотки в нормальное состояние, коммутатора тока и поглотителя энергии. Исследования, связанные с созданием устройств эвакуации, проводимые в криогенном отделе ОИЯИ, были направлены, в основном, на разработку коммутаторов тока и поглотителей энергии.

В экспериментах с СПМС с замоноличенной обмоткой из внутренне-стабилизированного Nb-Ti-кабеля / $S_M \cdot S_{СП} = 1:1$ / была получена скорость распространения нормальной зоны при достижении $J_c \approx 3,4$ кА и последующей эвакуации энергии на внешнее омическое сопротивление / $\sim 0,04$ Ом/ ~ 700 м/с^{1/}. При этом /даже с использованием быстродействующих электронного датчика перехода и тиристорного коммутатора/ почти половина запасенной энергии / ~ 200 из ~ 500 кДж/ выделялась внутри криостата. Снизить эту долю энергии можно было бы, в основном, за счет увеличения скорости эвакуации, чего можно достичь повышением напряжения на концах обмотки при выводе энергии, или путем изменения характера спада тока - с экспоненциального на линейный.

Сходная ситуация возникала в электротехнике в 50 гг. при решении проблемы гашения магнитного поля крупных синхронных генераторов, когда для ограничения разрушений, возникающих при пробоях изоляции и коротких замыканиях в обмотке статора, потребовалось максимально возможное уменьшение времени снижения /до нуля/ тока ротора. Тогда же О.Б.Броном, А.В.Мозалевским, Я.Н.Штрафуном и В.А.Образцовым были предложены автоматы гашения поля /АГП/^{2/}, обеспечивающие линейный спад тока ротора при практически неизменном напряжении на концах его обмотки. В АГП использовались кольцевые дугогасительные решетки из набора медных дисков, между которыми зажигались короткие /2-3 мм длиной/ электрические дуги. Проведенные О.Б.Броном исследования показали, что падение напряжения на такой дуге неизменно и составляет 25-30 В в широком диапазоне изменения тока /от малой величины до 24 кА/. Такой оптимальный /с точки зрения скорости процесса/ режим эвакуации энергии весьма перспективен и для защиты крупных СПМС.

Естественно, что специфика СПМС предъявляет дополнительные требования к устройствам эвакуации, в которых используются дугогасительные решетки. Во-первых, чтобы не допустить значительного распространения нормальной зоны до начала эвакуации энергии, необходи-

мо всемерно снижать время /срабатывания датчика перехода и коммутатора/ от ее зарождения в сверхпроводнике обмотки до начала эвакуации при напряжении $U_{ЭВ} \approx \text{const}$. Конструкция разработанных серийных автоматов гашения поля обеспечивает суммарное время работы привода АГП и входа дуги в дугогасительную решетку $\sim 0,1$ с. Снижение этого времени - безусловный резерв повышения эффективности работы устройств эвакуации энергии из СПМС с использованием дугогасительных решеток.

Другой особенностью конструкции некоторых СПМС, которую необходимо учитывать при выборе скорости эвакуации, является наличие "холодных" магнитно связанных со сверхпроводящей обмоткой металлических контуров с очень высокой электропроводностью, что отражается на протекании переходных процессов при эвакуации.

Наконец, в-третьих, с выбором скорости эвакуации энергии из СПМС связана и специфика криогенных электроизоляционных конструкций^{3/}, приводящая к тому, что в настоящее время уровень номинальных напряжений устройств эвакуации крупных СПМС не превышает 3÷5 кВ. Причем, видимо, имеет смысл вести эвакуацию энергии из СПМС при различных, оперативно выбираемых величинах $U_{ЭВ}$ - в зависимости от характера аварийных ситуаций.

С учетом всего сказанного можно утверждать, что наиболее эффективной схемой защиты внутренне-стабилизированных СПМС является такая, которая состоит из достаточно быстродействующих датчика перехода и коммутатора тока, а также поглотителя энергии, обеспечивающего ее вывод из СПМС при постоянном напряжении, равном максимально допустимому с точки зрения электрической прочности изоляции обмотки и с учетом переходных процессов в СПМС при уменьшении тока.

В настоящее время в схемах крупных СПМС используются современные быстродействующие коммутаторы токов в несколько килоампер, в частности, вакуумные, тиристорные и сверхпроводящие^{1,4/}. Собственное время "отключения" этих коммутаторов не превышает нескольких миллисекунд.

Использование АГП для эвакуации энергии из крупных СПМС предложено и осуществлено в 1969 году ^{/5/}. С тех пор в ОИЯИ были проведены исследования, направленные на усовершенствование серийного АГП и устройств эвакуации для СПМС с использованием дугогасительных решеток. К настоящему времени уже накоплен достаточный опыт по применению серийных и специальных АГП для эвакуации энергии /свыше 1 МДж/ из крупных СПМС ^{/1,5,7/}. Ниже приведены результаты некоторых из этих исследований.

Разработан, изготовлен и испытан с индуктивным накопителем энергии новый индукционно-динамический привод /ИДП/ ^{/6/} контактов АГП. Это снизило время его срабатывания с 50 до 5 мс за счет значительного увеличения скорости движения подвижных частей контактной системы АГП.

Проведена также серия экспериментов по эвакуации энергии из СПМС / $J_c = 1,85$ кА, $W_c = 220$ кДж ^{/5/}/ на одну и ту же дугогасительную решетку при различных $U_{эВ} = \text{const}$, что достигалось закорачиванием части промежутков решетки наружными перемычками. Например, число промежутков решетки серийного АГП-30-32 менялось таким образом от 15 до 30, что соответствовало эвакуации энергии при $U_{эВ} = \text{const}$ от 0,5 до 1,1 кВ /во всех случаях $J_0 = 500$ А/.

С целью дальнейшего повышения быстродействия АГП авторами /Н.Г.Анищенко и Ю.А.Шишовым/ было предложено и исследовано в работе устройство эвакуации с дугогасительной решеткой, шунтированной тонкой провололочкой. Проволочка, устанавливаемая на входе в решетку, быстро сгорая сразу же после начала размыкания разрывных контактов АГП, инициировала электрическую дугу непосредственно в решетке, исключая процесс движения к ней дуги от контактов. Быстродействие устройства, использующего шунтированную дугогасительную решетку, достигается не только за счет сокращения общего времени коммутации дуги в решетку, но и благодаря возможности применения в таких системах любых, в том числе современных бездуговых быстродействующих коммутаторов. Кроме того, преимуществом шунти-

рованных дугогасительных решеток по сравнению с типовыми является предоставляемая ими возможность вести эвакуацию энергии при напряжении в несколько десятков киловольт. Такие напряжения эвакуации, не обеспечиваемые в настоящее время типовыми АГП, могут потребоваться в будущем для устройств защиты весьма крупных СПМС /энергетические накопители, системы для термоядерного синтеза и т.п./.

Многочисленные эксперименты с шунтированной дугогасительной решеткой, проведенные в криогенном отделе ОИЯИ, показывают, что при соответствующих подборе сечения проволоки и способе ее установки работа такого устройства вполне надежна, и можно добиться быстрой коммутации дуги в решетку. Например, получено время сгорания медной проволоки $\phi 0,31$ мм /и, соответственно, коммутации тока 500 А из цепи контактов АГП в дугогасительную решетку/ около 2 мс.

Наконец, в схеме с шунтированной решеткой в качестве коммутатора был использован созданный в криогенном отделе ОИЯИ сверхпроводящий выключатель /рис. 1/. Исследования проводились на упомянутой выше СПМС ОИЯИ ^{/5/} без срыва сверхпроводящего состояния соленоида, т.е. путем отключения СПМС вручную при токах, близких к критическому.

Сверхпроводящий выключатель /СВ/, конструкция которого аналогична представленной в ^{/4/}, имеет электрическое управление импульсом тока от конденсаторной батареи /1000 мкФ, 1000 В/. Сопротивление СВ в нормальном состоянии ~ 7 Ом, $J_c \approx 2$ кА. Выключатель изготовлен из Nb-Ti жил, замоноличенных эпоксидным компаундом. На рис.2 представлены характерные осциллограммы напряжения и тока / $J_0 = 500$ А/ соленоида при эвакуации из него энергии с помощью такого устройства. В другом режиме эвакуации /при $J_0 = 750$ А и $U_{эВ} = 500$ В/ ~ 40 кДж запасенной энергии получено время от подачи управляющего импульса на отключение СВ до появления дуги в решетке АГП не более 2 мс. Причем, собственное время отключения СВ составило ~ 70 мкс.

Таким образом, впервые было осуществлено соединение в одном устройстве быстрой коммутации тока

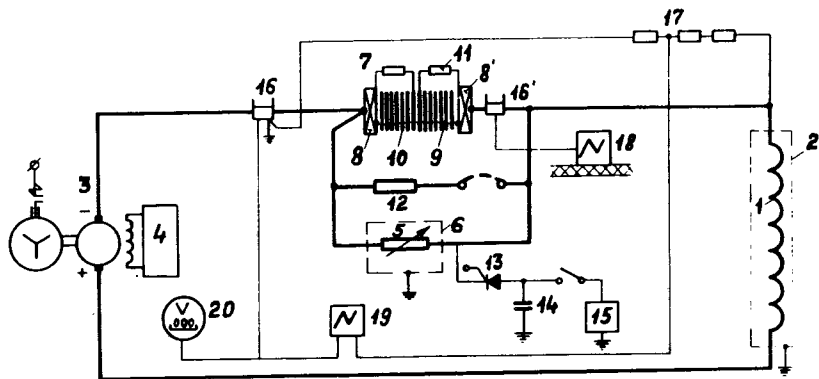
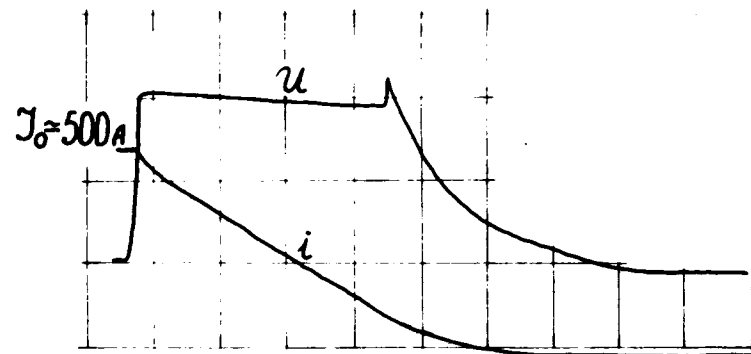


Рис. 1. Электрическая схема СПМС с устройством эвакуации энергии, состоящим из шунтированной дугогасительной решетки и сверхпроводящего выключателя: 1 - сверхпроводящий соленоид; 2 - гелиевый криостат $\phi 800$ мм; 3 - мотор-генератор типа АНГ/2500/5000 А, 12/6 В; 4 - тиристорный источник возбуждения генератора; 5 - сверхпроводящий выключатель; 6 - криостат $\phi 300$ мм; 7 - дугогасительная решетка АГП /в работе 15 промежутков/; 8 - катушки магнитного поперечного дутья; 9 - шунтирующая тонкая проволока; 10 - медные диски; 11 - шунтирующие сопротивления; 12 - гасительное сопротивление /чугунное/ $\sim 0,7$ Ом; 13 - управляемый вентиль ВКУ-150; 14 - батарея конденсаторов $10 \times K41-И7$ /5 кВ; 1000 мкФ/; 15 - стабилизированный выпрямитель ВС-26; 16, 16' - измерительные шунты /сухие/ 3000 А; 75 мВ; 17 - делитель напряжения 20:1; 18, 19 - запоминающие осциллографы С1-37 и С8-11; 20 - цифровой вольтметр TR-6515.

и оптимальной эвакуации энергии при $U_{ЭВ} = \text{const}$. Необходимо отметить в заключение, что предлагаемое устройство позволяет создавать оптимальные системы эвакуации энергии не только для рассматриваемых СПМС. В сочетании, например, с тиристорным выключателем такое устройство может стать одним из перспективных объектов исследований, направленных на развитие и усовершенствование систем гашения поля для сверхмощных электрических машин обычного, "теплого" исполнения.



$$t_{\text{вх}} \approx 3 \text{ мс}; t_{\text{реш}} \approx 100 \text{ мс}; U_{\text{вх}} \approx 460 \text{ в}$$

МАСШТАБЫ: 200 А/дел.; 230 В/дел.; 25 мс/дел.

Рис. 2. Осциллограммы тока (i) и напряжения (U) при эвакуации энергии из СПМС /5/ с помощью устройства с шунтированной /проволочкой $\phi 0,5$ мм/ дугогасительной решеткой /15 промежутков/ и сверхпроводящим выключателем. Время коммутации тока в решетку ~ 3 мс. Масштабы: 200 А/дел., 230 В/дел., 25 мс/дел.

Литература

1. В.Р.Карасик и др. Препринт ФИАН 112, Москва, 1974.
2. О.Б.Брон. Автоматы гашения поля. Госэнергоиздат, 1961.
3. Н.Г.Анищенко, Э.Яворский. ОИЯИ, Р8-7663, Дубна, 1974.
4. Х.Менке, Ю.А.Шишов. ОИЯИ, Р8-7855, Дубна, 1974.
5. Н.Г.Анищенко и др. ОИЯИ, 8-4882, Дубна, 1969.
6. А.И.Блудов, А.М.Еленкин, В.В.Ивашин. ПТЭ, №4, 241 /1973/.
7. А.И.Агеев и др. ОИЯИ, 9-9363, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 июля 1976 года.