

12185



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

8 - 12185

Н.Г.Анищенко, Р.Людеманн, Г.П.Цвинева,  
Ю.А.Шишов

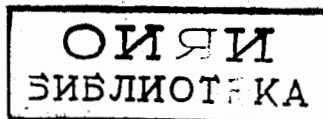
ЭВАКУАЦИЯ ЭНЕРГИИ  
ИЗ КРИОСТАТИЧЕСКИ НЕ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ  
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ

1979

8 - 12185

Н.Г.Анищенко, Р.Людемманн, Г.П.Цвинева,  
Ю.А.Шишов

**ЭВАКУАЦИЯ ЭНЕРГИИ  
ИЗ КРИОСТАТИЧЕСКИ НЕ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ  
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ**



Эвакуация энергии из криостатически не стабилизированных сверхпроводящих магнитов

Представлены расчетные и экспериментальные результаты исследования работы лабораторного соленоида (0,15 кА; 8 Т; 50 кДж) во время эвакуации энергии. Обмотка соленоида, выполненная из внутренне-стабилизированного проводника, не имеет каналов для жидкого гелия. Используются различные коммутаторы тока и поглотители запасенной в соленоиде энергии. Показано, что эффективность эвакуации энергии в дугогасительную решетку автомата гашения поля на 5-25% выше, а максимальная температура в обмотке существенно ниже, чем при использовании омического сопротивления. Расчеты были проведены на ЭВМ методом тепловых балансов. Экспериментальные результаты получены методом осциллографирования переходных процессов.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1979

Energy Evacuation from Cryostatically Nonstabilized Superconducting Magnets

The calculation and experimental results investigation of a laboratory solenoid (0,15 kA; 8T; 50 kJ) during energy evacuation are presented. The coil winding made of internal stabilized conductor has no channels for liquid helium. Various current switches and absorbers of energy are used. It is shown that the efficiency of energy evacuation in automatic machine of field quench is by 5-25% more and maximum temperature in the winding is essentially less, than in ohmic resistance. The calculations were performed by a thermal balance method. The experimental results were obtained by the oscillographing transition processes.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

В настоящей работе рассматриваются внутренне-стабилизированные магниты с обмотками без каналов для жидкого гелия, т.е. не имеющие криостатической стабилизации. Подобные обмотки иногда называют также "плотными" /1/. процесс их перехода в нормальное состояние имеет свои особенности.

Особенности переходных процессов при эвакуации энергии сверхпроводящих магнитов /СПМ/ и разновидности элементов устройств их защиты

Большинство аварий СПМ связано с переходом части сверхпроводника в нормальное состояние. Чрезмерное увеличение температуры отдельных участков обмоток магнитов, в особенности "плотных", а также большие электрические напряжения в них - основная опасность при таких переходах. Один из способов избежать или уменьшить объем повреждений при авариях заключается в обеспечении эффективной\* эвакуации запасенной в СПМ энергии в ее поглотители.

Процесс снижения транспортного тока при аварийной эвакуации энергии сопровождается следующими явлениями в обмотке магнита. Нормальная зона, появившаяся в одной или сразу нескольких точках обмотки, распростра-

\*Эффективность эвакуации энергии ( $\eta$ ) - отношение доли энергии, выведенной из магнита, к полной энергии, запасенной в нем.

няется вдоль проводника со скоростью в несколько десятков метров в секунду<sup>/2/</sup> и более<sup>/3/</sup>. Распространение нормальной зоны в "плотной" обмотке СПМ носит трехмерный характер.

Участки обмотки с нормальной зоной нагреваются транспортным током, который после подключения поглотителя начинает быстро уменьшаться. Под воздействием соответствующего изменения магнитного поля в проводнике возникают потери - вихревые и гистерезисные, что приводит к дополнительному нагреву всей обмотки. В ряде случаев, например, для СПМ постоянного тока, не снабженных специальными каналами охлаждения, нагрев обмотки при быстрой эвакуации энергии можно считать адиабатическим. В некоторых местах обмотки такой нагрев может привести к превышению температуры перехода сверхпроводника в нормальное состояние, что вызовет появление новых нормальных зон, в которых транспортный ток создает дополнительные потери. Возникает задача определения оптимальной скорости снижения транспортно-го тока - с точки зрения максимальной эффективности эвакуации.

Эффективность эвакуации зависит от многих факторов: конструкции проводника и изоляции, способа охлаждения обмотки, близости начального тока магнита к критическому, напряжения\* на концах обмотки в процессе эвакуации, величины времени полной коммутации тока\*\* ( $t_{п.ком.}$ ) и характера снижения транспортно-го тока. Все это влияет на величину скорости распространения нормальной зоны по обмотке, а характер снижения тока определяется типом используемого поглотителя энергии.

Под действием транспортного тока наиболее нагретыми /до температуры  $T_{макс.}$ / оказываются те участки обмотки, в которых первоначально зародилась нормальная зона. На величину  $T_{макс.}$  влияют, в основном, условия охлаждения обмотки жидким гелием, величина  $t_{п.ком.}$ , характер и скорость снижения транспортно-го тока. Величина

\* Максимальное значение напряжения на концах обмотки магнита при эвакуации обозначим  $U_{эв.макс.}$

\*\* Временем полной коммутации тока ( $t_{п.ком.}$ ) устройства эвакуации считается время с момента появления нормальной зоны до полного переключения тока в цепь поглотителя энергии.

допустимой  $T_{макс.}$  может быть принята неодинаковой для различных магнитов. Так, например, из условий сохранения свойств электрической изоляции с использованием лавсановой пленки можно принять  $T_{макс.} \approx 400$  К. Такое значение  $T_{макс.}$  принято также для СПМ с косвенным криостатированием, разрабатываемых в Лоуренсовской лаборатории в Беркли<sup>/2,4/</sup>. В других случаях, исходя, например, из необходимости обеспечить минимальные температурные деформации в обмотке, можно принять  $T_{макс.} \approx 100$  К: при таком нагреве разница в интегральных термических усадках материалов обмотки еще невелика.

Транспортный ток, помимо нагрева, создает падение напряжения на участках обмотки с нормальной зоной. При неэффективной /например, при  $\eta < 0,5$ / эвакуации максимальное значение напряжения на участке с нормальной зоной оказывается выше, чем  $U_{эв.макс.}$  на выводах магнита<sup>/5/</sup>. Особенно велико внутреннее напряжение в "плотных" обмотках.

Таким образом, работу устройств эвакуации энергии из СПМ можно охарактеризовать несколькими показателями. Одна группа этих показателей - технические параметры устройств: чувствительность датчика перехода обмотки в нормальное состояние;  $t_{п.ком.}$ ; напряжение эвакуации /в том числе  $U_{эв.макс.}$ /. Другая группа показателей отражает поведение обмотки СПМ при эвакуации: максимальное значение напряжения на участке с нормальной зоной;  $T_{макс.}$ ;  $\eta$ ; величина механических напряжений внутри обмотки и в некоторых элементах конструкции магнитной системы.

Любое устройство защиты СПМ с эвакуацией энергии состоит из: 1/ датчиков аварийных ситуаций, в том числе датчика перехода обмотки в нормальное состояние, с соответствующей электронной схемой<sup>/6/</sup>; 2/ коммутатора тока /КТ/<sup>/7/</sup>; 3/ поглотителя энергии.

Существует несколько различных методов и схем обнаружения нормальной зоны. Наиболее распространена схема "мостика"<sup>/8,9/</sup>, быстрое действие которой при использовании электроники вполне достаточно. Предложены и другие способы детекции: например, основанные на измерении напряжения на выводах магнита или на отдельных участках его обмотки<sup>/10/</sup>, использовании сверхпроводящего датчика<sup>/11/</sup>, акустического эффекта в криостате с жидким

гелием <sup>12/</sup> и др. Акустический способ в последние годы интенсивно исследуется, остальные же /кроме схемы "мостика"/ не вышли за рамки экспериментального опробования.

Выбор чувствительности датчика перехода обмотки в нормальное состояние и допустимой величины  $t_{п.ком.}$  в значительной степени определяется скоростью распространения нормальной зоны в объеме обмотки СПМ.

Коммутация тока в устройствах эвакуации энергии из СПМ чаще всего осуществляется электромеханическими выключателями с обычным электромагнитным приводом. Собственное время отключения этих КТ обычно  $0,1 \div 0,15$  с <sup>16,13/</sup>. В ряде случаев такое быстродействие недостаточно. Существуют и быстродействующие электромеханические коммутаторы, снабженные, например, индукционно-динамическим приводом контактов. Таким приводом <sup>14/</sup> снабжен один из автоматов гашения поля /АГП/, используемый в криогенном отделе ЛВЭ ОИЯИ для эвакуации энергии из СПМ. Благодаря этому собственное время отключения контактов АГП снижено со 150 мс /заводской привод/ до 5 мс.

Перспективны для использования в устройствах эвакуации энергии из СПМ вакуумные выключатели <sup>15,16/</sup>.

В последние годы в схемах эвакуации энергии из СПМ все чаще применяются бездуговые быстродействующие КТ - тиристорные <sup>13/</sup> и сверхпроводящие <sup>15/</sup>. Это позволяет уменьшить  $t_{п.ком.}$  до 0,5 мс /и менее/. А собственное время отключения, например, сверхпроводящего выключателя, испытанного при 200 А и 50 кВ, составило менее 10 мкс <sup>17/</sup>.

Поглотителями энергии в устройствах эвакуации могут служить: омические линейное и нелинейное сопротивления <sup>10/</sup>; предварительно заряженный конденсатор большой емкости; аккумуляторная батарея, допускающая кратковременное протекание больших токов; дугогасительная решетка АГП <sup>17/</sup>.

#### Цель и методика экспериментов, описание стенда

Цель данной работы - экспериментальное определение эффективности эвакуации и расчет максимальной темпера-

туры "плотной" обмотки внутреннестабилизованного СПМ в зависимости от способа запуска устройства защиты, величины напряжения эвакуации, типа поглотителя энергии и быстродействия коммутатора тока.

Эксперименты проведены на лабораторной сверхпроводящей магнитной системе, содержащей соленоид с высокой однородностью магнитного поля /8 Т, 150 А; 50 кДж;  $0,8 \div 2,3 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup>; проводник НТ-50 с КЗ- 50%/ . Более подробно СПМ описан в <sup>15/</sup>. Некоторые особенности соленоида /адиабатически изолированный от жидкого гелия проводник, наличие в обмотке нескольких зон с состоянием, близким к критическому, и др./ значительно затрудняют получение высокой эффективности эвакуации.

Электрическая схема испытательного стенда приведена на рис. 1. Источник питания 3 рассчитан на 200 А, 5 В. В схеме предусмотрено два вида поглотителей: 1/ омическое сопротивление  $5 /0,5 \div 6,0$  Ом/, подключаемое к магниту при эвакуации с помощью тиристорного выключателя 4 /250 А; 1,2 кВ; 0,2 мс/; 2/ дугогасительная решетка 6, подключаемая при размыкании контактов серийного АГП /1,25 кА; 1,5 кВ; 0,8 МДж/. Изменение

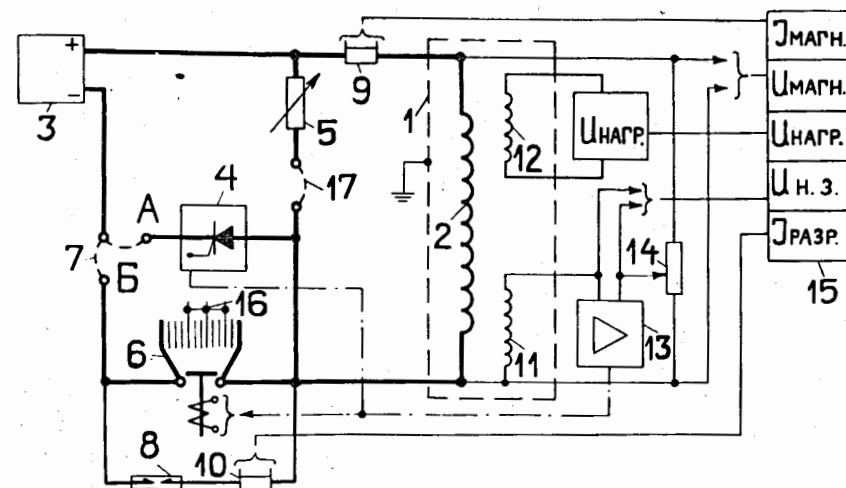


Рис.1. Принципиальная электрическая схема стенда /обозначения в тексте/.

величины  $U_{эв, макс.} = const$  при эвакуации на АГП осуществляется шунтированием части промежутков решетки переключкой 16. Магнитный разрядник 8 ограничивает перенапряжения в схеме при обрыве тока в решетке в конце эвакуации. Детектор нормальной зоны в обмотке магнита выполнен по схеме "мостика" со вспомогательной катушкой 11 и делителем напряжения 14 /многооборотный потенциометр 500 Ом, 5 Вт/. Сигналы с диагонали "мостика" подаются на электронный блок 13, где после усиления производится их селекция по амплитуде и длительности для отстройки от помех и скачков магнитного потока в обмотке. Детектор срабатывает при превышении определенных регулируемых порогов в пределах 50 ÷ 100 мВ и 1 ÷ 10 мс. Нагреватель 12 / $R_{290K} = 180 \text{ Ом}$ / намотан поверх одной из внутренних секций магнита. Остальные позиции на рис. 1 обозначают: 1 - криостат с внутренним диаметром 300 мм; 2 - сверхпроводящий магнит; 7, 17 - переключки для подключения в схему одного из двух поглотителей энергии; 9, 10 - измерительные шунты; 15 - светолучевой осциллограф типа К-115.

Расчетное значение индуктивности обмотки магнита - 4,8 Г. Погрешность полученных результатов в целом /измерения, обработка осциллограмм/ - не более ±3%.

Запуск устройств защиты СПМ осуществляется одним из трех способов: а/ вручную; б/ автоматически детектором нормальной зоны после подачи импульса в нагреватель, встроенный в обмотку магнита; в/ автоматически детектором нормальной зоны при превышении критического тока.

#### Расчет максимальной температуры нагрева обмотки при эвакуации энергии

При эвакуациях энергии, которым предшествует или в течение которых происходит переход сверхпроводника в нормальное состояние, самыми нагретыми точками обмотки оказываются те, в которых первоначально появилась нормальная зона. Для таких точек при адиабатических условиях нагрева элементарного объема проводника транспортным током справедливо уравнение теплового баланса:

$$m \cdot c_p(T) dT = R(T) \cdot i^2(t) dt, \quad /1/$$

где  $m$  и  $R(T)$  - масса и электрическое сопротивление элемента длины проводника;  $c_p(T)$  - удельная теплоемкость проводника;  $i(t)$  - транспортный ток, начиная с момента появления нормальной зоны в обмотке;  $T$  - температура проводника;  $t$  - время.

Разделяя переменные в /1/ и интегрируя, можно определить температуру самой нагретой точки обмотки для любого момента времени:

$$S^2 \gamma \int \frac{c_p(T)}{\rho(T)} dT = \int i^2(t) dt, \quad /2/$$

где  $\rho(T)$ ,  $\gamma$  и  $S$  - соответственно удельные сопротивление и вес, а также площадь поперечного сечения проводника.

В составленной по /2/ программе для ЭВМ удельные теплоемкость\* и сопротивление проводника определяются по уравнениям:

$$\bar{c}_p(T) = \frac{a \cdot \gamma_n \cdot c_{pn}(T) + \gamma_s \cdot c_{ps}(T)}{a \gamma_n + \gamma_s},$$

$$\bar{\rho}(T) = \frac{1 + a}{a/\rho_n + 1/\rho_s} = \rho_n \left(1 + \frac{1}{a}\right),$$

где:  $a$  - отношение сечений меди и сверхпроводника в проводнике;  $\gamma_n$  и  $\gamma_s$  - удельные веса меди и сверхпроводящего сплава НТ-50;  $c_{pn}(T)$  и  $c_{ps}(T)$  - удельные теплоемкости меди и сверхпроводника;  $\rho_n$  - удельное сопротивление меди матрицы /для исследуемого СПМ принято  $\rho_n 300K / \rho_n 4K = 100$ /;  $\rho_s \rightarrow \infty$  - удельное сопротивление сверхпроводника.

На рис. 2 показана расчетная кривая  $\theta(T)$  для исследуемого СПМ, представляющая собой подынтегральное

\* Принимается допущение, что теплообмен между медью матрицы и сверхпроводящими жилами в проводнике идеальный.

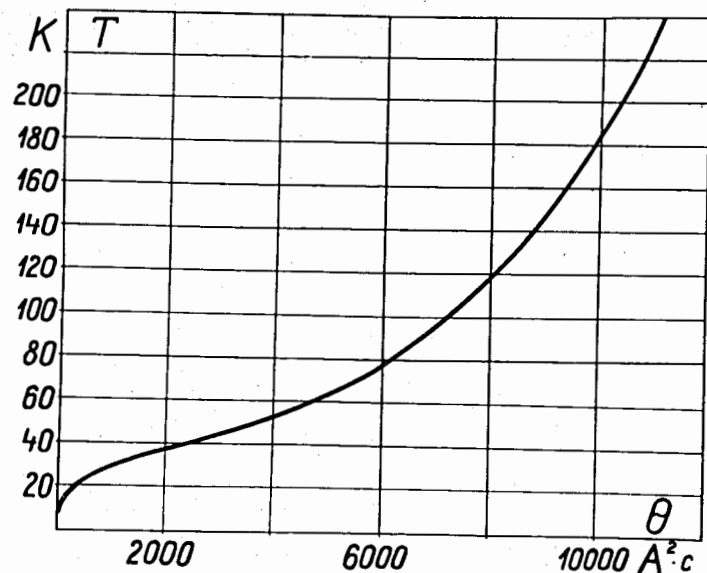


Рис.2. Расчетная зависимость температуры наиболее нагретой точки обмотки исследуемого магнита от величины

$$\theta = S^2 \gamma \int_{4K}^T \frac{\bar{c}(T)}{\bar{\rho}(T)} dT.$$

выражение левой части уравнения /2/, вычисленное при нижнем пределе интеграла, для упрощения принято равным  $4 \text{ K}$  /а не температуре перехода данного участка сверхпроводника/. Используя эту зависимость, ЭВМ определяет соответствующую температуру  $T$  нагрева обмотки - по величине, характеризующей количество выделившегося в обмотке тепла, подсчитываемой по правой части уравнения /2/. Отметим, что величина правой части уравнения /2/ для режимов эвакуации на нелинейное сопротивление или АГП может быть в 1,5 раза ниже, чем при эвакуации на омическое сопротивление<sup>2/</sup>. Соответственно уменьшается и температура самой нагретой точки обмотки.

Составленная для ЭВМ программа, аналогичная использованной в<sup>2/</sup>, позволяет проводить два вида расчетов: 1/ предварительную оценку величины  $T_{\text{макс.}}$  для проектируемых СПМ; 2/ определение  $T_{\text{макс.}} = f(t)$  для

экспериментальных кривых спада тока, если известен момент начала перехода обмотки в нормальное состояние. При выполнении расчетов первого вида предполагается либо чисто экспоненциальный спад тока /эвакуация на сопротивление/, либо линейный /на АГП, например/. Затем оценивается влияние величины  $t_{\text{п.ком.}}$  и  $U_{\text{эв.макс.}}$  выбранного устройства эвакуации на  $T_{\text{макс.}}$ . Таким образом могут быть определены требования к быстродействию КТ и к виду поглотителя энергии. Эта предварительная оценка дает завышенное значение  $T_{\text{макс.}}$ , поскольку в расчете не учитывается влияние нормальной зоны в обмотке на форму кривой тока. В реальном режиме эвакуации время спада тока и, соответственно, величины  $\theta$  и  $T_{\text{макс.}}$  будут несколько меньше.

#### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Всего проведено свыше 80 эвакуаций на сопротивление и более 40 - на АГП. Начальный ток магнита ( $J_{\text{МО}}$ ) менялся от 40 А до критического ( $J_{\text{МС}}$ ) при  $U_{\text{эв.макс.}} = 12-750 \text{ В}$ . Некоторые результаты обработки полученных осциллограмм приведены на рис. 3 и 4. Сравнение соответствующих режимов эвакуации на АГП и сопротивление показывает, что применение АГП в данных экспериментах не приводило к увеличению скорости распространения нормальной зоны по обмотке /рис. 3/. А за счет сокращения времени протекания транспортного тока через участки с нормальной зоной при эвакуациях на АГП внутри обмотки выделяется меньшая доля энергии. Соответственно увеличивается эффективность эвакуации /рис. 4/: при ручном запуске устройств защиты и начальных токах 120А эффективность эвакуации на АГП /кривая 1/ на 10-25% выше, чем на сопротивление /кривая 2/; при автоматическом запуске после подачи импульса в нагреватель и начальных токах 120 А эффективность эвакуации на АГП /кривая 3/ на 8-10% выше, чем на сопротивление /кривая 4/; в режимах автоматического запуска при достижении критических токов эффективность при эвакуации на АГП /кривая 5/ на 5-10% выше, чем на сопротивление /кривая 6/.

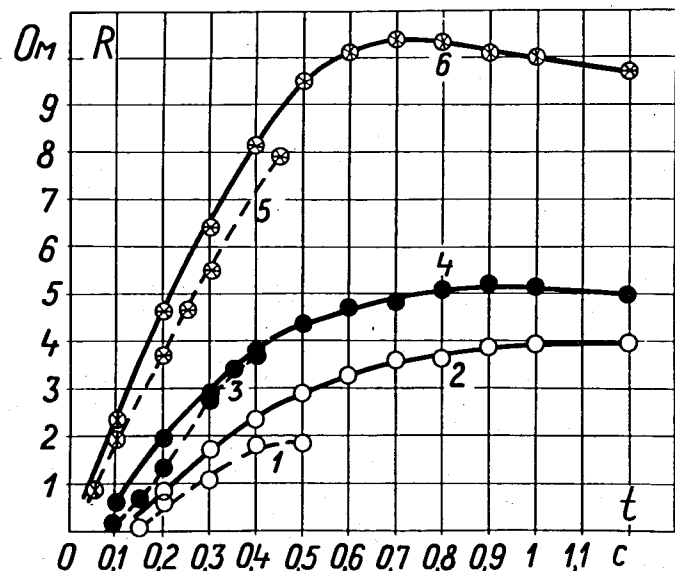


Рис.3. Зависимость от времени сопротивления нормальной зоны в обмотке исследуемого соленоида в различных режимах эвакуации. 1,2 -  $J_{MO} = 120$  А, ручной запуск; 3,4 -  $J_{MO} = 120$  А, автоматический запуск, нагрев магнита; 5,6 -  $J_{MC}$ , автоматический запуск. Пунктирные кривые - эвакуация на АГП, сплошные - на сопротивление.

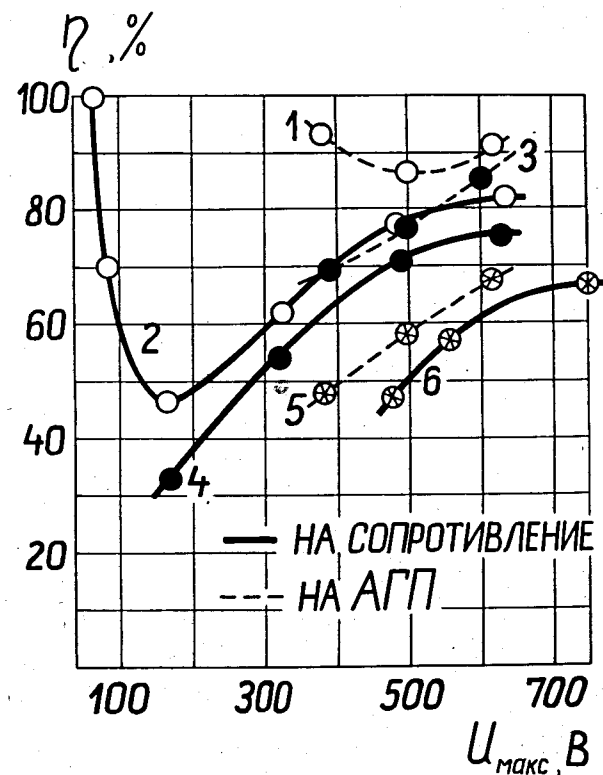


Рис.4. Зависимость эффективности эвакуации от максимального напряжения на концах обмотки для различных поглотителей энергии. /обозначения те же, что и на рис. 3/.

Быстродействие КТ и характер спада тока также влияют на величину  $T_{макс.}$ . Так, например, в условиях одинакового быстродействия КТ в режимах с достижением  $J_{MC}$  /при  $U_{эв,макс.} = 500$  В/ при эвакуации на сопротивление расчетное значение  $T_{макс.}$  составило 76 К, а на АГП - 62 К. На рис. 5 представлены результаты расчетов зависимостей  $T_{макс.}$  от величин  $t_{п.ком.}$  и  $U_{эв,макс.}$  для чисто экспоненциального и линейного характеров снижения тока со значения  $J_{MO}$ , равного 120 А. По этим предварительным оценкам для исследуемого СПМ при  $U_{эв,макс.} \leq 300$  В и  $T_{макс.} \leq 400$  К эвакуация на сопротивление допустима только при  $t_{п.ком.} \leq 20$  мс. При эвакуации на АГП эти же условия соблюдаются в случае  $t_{п.ком.} \leq 320$  мс. Влияние быстродействия КТ в данном случае можно оценить, например, так: при эвакуации на сопротивление в режимах с  $U_{эв,макс.} = 400$  В

снижение  $t_{п.ком.}$  со 150 мс до 0,5 мс /замена обычного электромеханического выключателя на тиристорный/ приводит к уменьшению  $T_{макс.}$  с 288 до 175 К.

Некоторые пути повышения быстродействия КТ в устройствах эвакуации на основе дугогасительных решеток показаны в [7]: перспективно, например, использование шунтированных плавким элементом дугогасительных решеток в сочетании со сверхпроводящими выключателями. В схемах эвакуации с таким КТ можно достигнуть  $t_{п.ком.} = 2$  мс.

Приведенные в работе результаты исследований получены на СПМ с небольшой запасенной энергией. Для



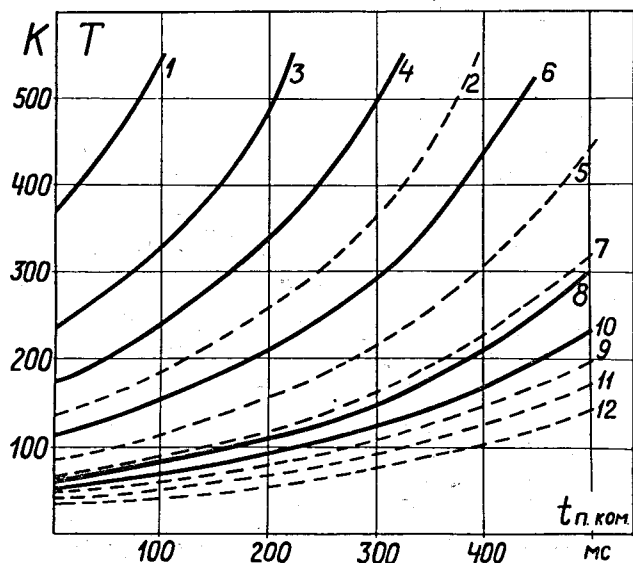


Рис.5. Влияние времени полной коммутации  $t_{п.ком.}$  и напряжения  $U_{эв.макс.}$  на максимальную температуру  $T$  нагрева обмотки исследуемого соленоида при экспоненциальном и линейном спаде тока  $J_{МО} = 120 \text{ А}$ . 1,2 -  $U_{эв.макс.}$  300 В; 3 - 350 В; 4,5 - 400 В; 6,7 - 500 В; 8,9 - 800 В; 10,11 - 1000 В; 12 - 1500 В. Пунктирные кривые - эвакуация на АГП, сплошные - на сопротивление.

внутреннестабилизированных магнитов с большими запасенной энергией и плотностью тока и, возможно, меньшей скоростью распространения нормальной зоны эффект от снижения  $t_{п.ком.}$  и использования дугогасительных решеток, приводящий к уменьшению  $T_{макс.}$  и увеличению  $\eta$ , будет более значительным.

Полученный в криогенном отделе ЛВЭ опыт применения серийных автоматов гашения поля для эвакуации энергии из СПМ с запасенными энергиями до 50 кДж /данная работа/, 0,5 МДж<sup>/3/</sup> и более 1 МДж<sup>/18/</sup>, а также устройства эвакуации на основе шунтированной дугогасительной решетки /для СПМ на 0,2 МДж<sup>/7/</sup>/ - показывает высокую надежность и эффективность их использования для защиты сверхпроводящих магнитных систем в аварийных условиях.

## Выводы

1. Для внутреннестабилизированного сверхпроводящего соленоида с адиабатически изолированной обмоткой и запасенной энергией до 50 кДж экспериментально установлено, что при одинаковых начальных токах и максимальных напряжениях на концах обмотки эвакуация на дугогасительную решетку автомата гашения поля на 5-25% эффективнее, чем вывод энергии на сопротивление.

2. Расчетом показано, что сокращение времени полной коммутации тока и использование поглотителя, обеспечивающего линейный спад тока, приводят к существенному понижению максимальной температуры нагрева обмотки сверхпроводящего магнита в процессе аварийной эвакуации энергии из него.

## Литература

1. Альтов В.А. и др. Стабилизация сверхпроводящих магнитных систем. "Энергия". М., 1975.
2. Eberhard P.H. et al. Preprint LBL-6718, August, 1977.
3. Карасик В.Р. и др. Препринт ФИАН, М., 1974, №112.
4. Green M.A. Preprint LBL-6717, August, 1977.
5. Кабат Д. и др. ОИЯИ, Б2-8-11411, Дубна, 1978.
6. Дубасов В.Г. и др. Препринт НИИЭФА, Б-0168, Л., 1972.
7. Анищенко Н.Г. и др. ОИЯИ, 9-10006, Дубна, 1976.
8. Агуреев В.Н. и др. Препринт ИАЭ-1524, М., 1968.
9. Cesnak L. et al. Cryogenics. 1972, v. 12, No.2, p. 116.
10. Maddock B.J. et al. Proc. IEE. 1968, Vol.115, No.4, p. 543.
11. Allinger J. et al. Interim report BNL-20787, November, 1975.
12. Turowski P. Proc. MT-6, Bratislava, September, 1977, p. 648.
13. Kircher F. et al. Proc. ICES-VI, Grenoble, May, 1976.
14. Блудов А.И. и др. ПТЭ, 1973, №4, с. 241.
15. Зенкевич В.Б. и др. Труды МТ-6, Братислава, 1977, с. 232.
16. Попов Н.А. Вакуумные выключатели. "Энергия". М.-Л., 1965.
17. Хейнц У. Труды конференции по техническому использованию сверхпроводимости, Алушта, сентябрь 1975. "Атомиздат", М., 1977, п. 1, с. 52.
18. Агеев А.И. и др. ОИЯИ, 9-9363, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел  
15 января 1979 года.