

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



К-12

18/12-78

8 - 11604

4087/2-78

Д.Кабат, Р.Людемманн, Х.Менке, Ю.А.Шишов

УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ
СО СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ПЕРЕМЫЧКОЙ

1978

8 - 11604

Д.Кабат, Р.Людеманн, Х.Менке, Ю.А.Шишов

УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ
СО СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ПЕРЕМЫЧКОЙ

Направлено в ПТЭ



Кабат Д. и др.

8 - 11604

Устройство защиты сверхпроводящих магнитов
со сверхпроводящей перемычкой

Создано устройство для аварийной эвакуации энергии из сверхпроводящих магнитов, работающих в режиме "замороженного тока". Предложена новая электрическая схема защиты магнита с помощью соединенных последовательно сверхпроводящих перемычки и выключателя. В экспериментах с лабораторным соленоидом (8Т, 150А, 50 кДж) продемонстрирована работоспособность системы.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Kabat D. et al.

8 - 11604

Protection Device for Superconducting Magnets with
a Superconducting Short-Switch

A device for quick energy removal from superconducting magnets operating in the persistent current mode was developed. A new magnet protection circuit including a superconducting short-switch and a current-power switch, connected in series, is proposed. Operating ability of the system in connection with the laboratory solenoid (8T, 150A, 50kJ) was demonstrated.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

Эксплуатация сверхпроводящих магнитов /СМ/ в режиме "замороженного тока" /РЗТ/ позволяет уменьшить расход криоагента и объем обслуживания. Эти преимущества обеспечивали таким СМ широкое распространение в лабораторной практике, в настоящее время они также используются в экспериментальных поездах на магнитной подушке и, несомненно, найдут применение в ряде других областей науки и техники.

Для успешной работы крупных СМ в РЗТ необходимы надежные устройства аварийной защиты. Известные решения этой задачи имеют существенные недостатки. Например, магнит /0,5 кА; 0,12 МДж/ поезда на магнитной подушке^{1/} снабжен механическим ключом с контактным сопротивлением 10^{-6} Ом, шунтирующим магнит в РЗТ, и вторичной алюминиевой обмоткой, соединенной с внутренним шунтом. Второй ключ и внешний шунт необходимы в период зарядки магнита. Наличие двух систем защиты чрезмерно усложняет устройство.

Рассмотрим требования, которым должно отвечать устройство защиты СМ ЗТ. Очевидно, что необходимо обеспечить эвакуацию запасенной в магните энергии как при вводе /и выводе/ тока, так и в РЗТ. Причем наиболее часто опасность перехода магнита в нормальное состояние возникает при вводе тока. Для обеспечения высокой эффективности эвакуации /отношение доли энергии, выделившейся в защитной нагрузке, к энергии, запасенной в магните/ традиционная сверхпроводящая перемычка /СП/ должна быть заменена или дополнена сверхпроводящим выключателем /СВ/, имеющим достаточно большое сопротивление в нормальном состоянии и быстро-

действующее управление. Кроме того, электрическую схему необходимо построить так, чтобы устройство питания магнита не препятствовало эвакуации.

В криогенном отделе ОИЯИ предложена и осуществлена схема защиты /рис. 1/, отвечающая перечисленным требованиям. К выводам магнита 1 последовательно подсоединены СВ 2 и СП 3, а также защитное сопротивление 4. К концам СП подключено устройство питания 5. Управление переключки 6 и выключателя 7 - раздельное. Величина сопротивления СП относительно невелика и выбрана из условия зарядки магнита. Сопротивление СВ определяется режимом эвакуации энергии /на один-два порядка больше, чем у СП/. СВ как при изменении тока, так и в РЗТ находится в сверхпроводящем состоянии. Перевод его в нормальное состояние с помощью

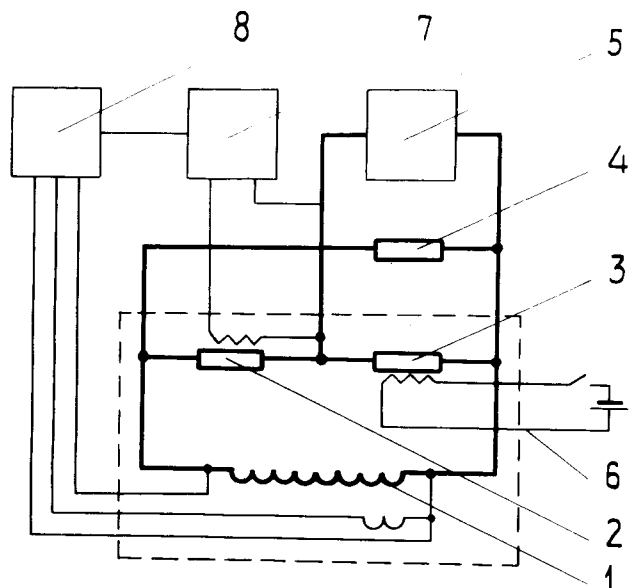


Рис.1. Схема электропитания и защиты сверхпроводящего магнита со сверхпроводящими переключкой и выключателем. 1 - магнит; 2 - выключатель; 3 - переключка; 4 - защитное сопротивление; 5 - устройство электропитания; 6 - блок управления переключки; 7 - блок управления выключателя; 8 - блок индикации нормальной зоны в магните. /Пунктирной линией обозначен криостат, утолщенной - принципиальная часть схемы/.

импульсного нагревателя управления 7 происходит автоматически в любой момент по сигналу устройства индикации 8, регистрирующего появление нормальной зоны в обмотке магнита.

Для проверки работоспособности рассматриваемой схемы электропитания и защиты использована лабораторная сверхпроводящая магнитная система /СМС/ /см. табл./, созданная в криогенном отделе ОИЯИ^{1/2/} и содержащая соленоид с высокой однородностью поля.

Следует отметить, что соленоид имеет ряд особенностей, обуславливающих его поведение при эвакуации. Во-первых, в обмотке существует не одна, как в несекционированном соленоиде, а несколько зон с состоянием, близким к критическому. Это объясняется методом конструирования, обеспечивающим комплексную оптимизацию размеров соленоида^{1/2/}. Загрузка сверхпроводников

Таблица. Основные параметры лабораторной СМС.

Наименование параметра	Размерность	Величина параметра
Соленоид		
Индукция в центре	Т	8,0
Критический ток	А	150
Максимальная запасенная энергия	кДж	50
Количество секций обмотки		7
Плотность тока в секциях	А/м ²	0,8±2,3·10 ⁸
Диаметры проводников (НТ-50, многожильные, К350%)	мм	0,70; 0,85; 1,20
Выключатель		
Диаметр проводника (НТ в медно-никелевой матрице)	мм	0,25
Количество проводников		3
Сопротивление при ИСК	Ом	41
Критический ток	А	200

в секциях, то есть отношение критического тока секции к критическому току магнита находится в пределах $0,7 \div 1,0$. Во-вторых, довольно велика плотность тока в обмотке. В-третьих, обмотка навита так, что практически можно считать проводник адиабатически изолированным от жидкого гелия. И, в-четвертых, межслоевая изоляция при изготовлении соленоида проверялась напряжением 1 кВ , так что принято решение вести эвакуацию при напряжении, не превышающем $0,5 \text{ кВ}$.

Нагревательный элемент СВ, выполненный из фольги, соединен с конденсаторной батареей через тиристор, который управляется выходным сигналом устройства индикации 8. Последнее срабатывает, когда величина и длительность действия резистивного напряжения в магните превышают определенные пороги $/500 \div 100 \text{ мВ}$, $1 \div 10 \text{ мс}$ - в данных экспериментах/. В устройстве индикации использована мостовая схема с вспомогательной катушкой.

Запуск устройства защиты при ее исследовании осуществлялся тремя способами: 1. Разряд конденсатора инициируется вручную. 2. Разряд инициируется устройством индикации при подаче импульса в нагреватель, установленный в обмотке соленоида. 3. Разряд инициируется устройством индикации при превышении критического тока соленоида.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

При энергии управления выключателем $\sim 50 \text{ Дж}$ /энергия, запасенная в конденсаторе/ время его перехода в нормальное состояние достаточно мало, особенно при начальном токе соленоида, близком к критическому значению. В последнем случае СВ переходит за $\sim 100 \text{ мкс}$. Однако сопротивление выключателя не достигает максимальной величины в 41 Ом , а составляет лишь $50 \div 80\%$.

Соленоид при эвакуации весьма легко и быстро переходит в нормальное состояние не только под действием нагревателя, но и самопроизвольно. Экспериментально установлено, что нормальная зона появляется

в соленоиде через некоторое время $/\geq 0,1 \text{ с}/$ после начала инициированной вручную эвакуации как результат потерь в проводнике, вызванных изменением магнитного поля и тока. Однако при начальном токе соленоида $\leq 80 \text{ А}$ и величине защитного сопротивления $\leq 5,3 \text{ Ом}$ нагрев обмотки от потерь недостаточен, и соленоид остается в сверхпроводящем состоянии.

Начальная скорость роста сопротивления в соленоиде составляет при инициированной вручную эвакуации $8 \div 10 \text{ Ом/с}$, при включении встроенного в соленоид нагревателя - $3,5 \div 5,0 \text{ Ом/с}$, при превышении критического тока соленоида - $15 \div 20 \text{ Ом/с}$. Эти скорости примерно на два порядка выше значений, полученных при расчете роста сопротивления за счет линейного распространения нормальной зоны из одной точки вдоль проводника в адиабатических условиях. Очевидно, в обмотке возникает одновременно множество нормальных зон.

На рис. 2 показаны зависимости эффективности эвакуации от начального тока соленоида и величины защитного сопротивления при различных способах инициирования эвакуации. Невысокая в некоторых режимах эффективность связана с бурным переходом соленоида в нормальное состояние, что объясняется вышеупомянутыми особенностями конструкции обмотки. Повысить эффективность в этих случаях можно за счет увеличения скорости эвакуации. Эффективность работы рассмотренной схемы защиты при использовании ее для не столь "метастабильных" обмоток может быть весьма высокой. Об этом свидетельствует рост эффективности с уменьшением начального тока, а значит, и плотности тока соленоида.

Более полные сведения об устройстве СМС с предложенной схемой защиты, о результатах ее испытаний и краткий обзор по вопросам защиты магнитов, работающих в режиме "замороженного тока", представлены в^{13/}.

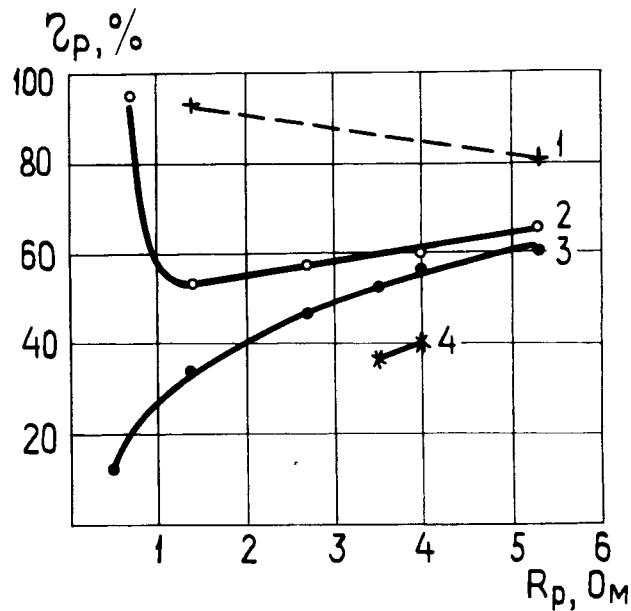


Рис.2. Зависимость эффективности эвакуации η_p запасенной в магните энергии от величин начального тока I_{M0} магнита и защитного сопротивления R_p при различных способах запуска устройства защиты. 1 - $I_{M0}/I_{MC} = 0,55$ - ручной запуск эвакуации; 2 - $I_{M0}/I_{MC} = 0,80$ - ручной запуск; 3 - $I_{M0}/I_{MC} = 0,80$ - нагрев магнита, автоматический запуск; 4 - $I_{M0}/I_{MC} = 1$ - автоматический запуск.

ВЫВОДЫ

1. Предложена новая схема электропитания и защиты сверхпроводящих магнитов, работающих в режиме "замороженного тока". Благодаря использованию сверхпроводящей перемычки и быстродействующего сверхпроводящего выключателя обеспечена возможность выведения энергии из магнита в любой момент работы, как при вводе /и выводе/ тока, так и в автономном режиме.

2. Работоспособность и эффективность предложенной схемы подтверждены экспериментами на лабораторной сверхпроводящей магнитной системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Albrecht C. et al. Superconducting levitated system: first results with the experimental facility at Erlangen Proc. Fifth Intern. Cryogenic Engin. Conf., Kyoto, 1974, pp. 28-34.
2. Кабат Д., Лысенко Е.Н., Шишов Ю.А. Сверхпроводящий соленоид с высокой однородностью магнитного поля и результаты измерений поля методом Я.М.Р. Препринт ИАЭ-2887, М., 1977.
3. Кабат Д. и др. Защита сверхпроводящих магнитов, работающих в режиме "замороженного тока". ОИЯИ, Б2-8-11411, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 мая 1978 года.