

С 345С
К-12

345С

+

2324/78

КАБАТ, Д. И ДР.

Б2-8-11411



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б 2-8-11411

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 19 79

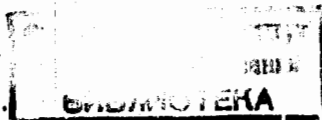
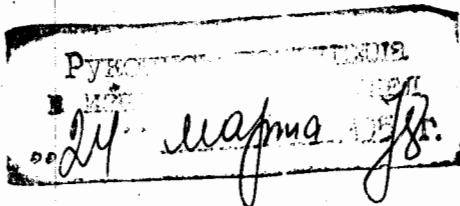
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

Б2-8-11411

Д.Кабат, Р.Людемани, Х.Менке, К.А.Шишов

ЗАЩИТА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ, РАБОТАЮЩИХ
В РЕЖИМЕ "ЗАМОРОЖЕННОГО ТОКА"



Дубна, 1978 г.

А Н Н О Т А Ц И Я

ЗАЩИТА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ, РАБОТАЮЩИХ В РЕЖИМЕ "ЗАМОРОЖЕННОГО ТОКА"

Представлен краткий обзор устройств для аварийной эвакуации энергии, запасенной в обмотках сверхпроводящих магнитов, работающих в режиме "замороженного тока". Предложена новая схема защиты с помощью соединенных последовательно сверхпроводящих перемычки и выключателя. Проведены эксперименты, результаты которых подтверждают работоспособность такого устройства. При измерениях использован лабораторный соленоид с плотностью тока в секциях обмотки $(0,8+2,3) \cdot 10^4$ А/см², критическим током ~ 150 А, индукцией в центре 8Т и запасенной энергией при критическом токе ~ 50 кДж. Перемычка и выключатель изготовлены из трех параллельных проводов диаметром 0,25 мм с жилами ниобий-титана в медно-никелевой матрице. Доля эвакуированной энергии составляет 50+70% запасенной в соленоиде.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

I. ВВЕДЕНИЕ

Сверхпроводящие магнитные системы (СМС), работающие в режиме "замороженного тока" (РЗТ), широко применяются в лабораторной практике /1,2/ и в экспериментальных поездах на магнитной подушке /3/. Однако, несмотря на большие достоинства, такие СМС не получили распространения в ускорительной технике. Магниты постоянного тока используются в накопителях и каналах для транспортировки ускоренных частиц, в физических установках, например, детекторах. Эксплуатация сверхпроводящих магнитов (СМ) в РЗТ позволит существенно сократить численность обслуживающего персонала и уменьшить расход криоагента, особенно в случае применения разъемных тоководов. Кроме того, может быть достигнута высокая стабильность магнитного поля, так как на нее не влияют пульсации напряжения в электрической сети и устройстве питания.

Медленное внедрение СМЗТ связано, по видимому, со следующими обстоятельствами. Во-первых, недостаточно освоен накопленный в мире опыт; во-вторых, переход к более крупным магнитам ускорительной техники требует проведения ряда проектных и исследовательских работ. В СМС физики высоких энергий применяются проводники, рассчитанные на токи в несколько килоампер, а запасенная в обмотках энергия достигает сотен мегаджоулей. Учитывая весьма строгие допуски на стабильность поля, необходимо разработать конструкции низкоомных и сверхпроводящих контактных соединений проводников большого сечения. Важно обеспечить безопасную эксплуатацию дорогостоящих крупных СМ и криостатов. В технической литературе эти вопросы освещены недостаточно и разрозненно, поэтому небольшой

обзор имеющихся в распоряжении авторов настоящей публикации материалов по вопросам защиты СМС может быть полезен. Рассмотрим характеристики некоторых известных устройств.

Довольно часто используются, особенно для небольших СМ, так называемые внутренние шунты. Вся обмотка делится на секции, к каждой из которых присоединен шунт, находящийся внутри криостата, в парах гелия. При переходе обмотки в нормальное состояние часть энергии выделяется в шунтах, поэтому температуры и напряжения в обмотке существенно понижаются. Иногда шунты снабжаются медленнодействующими механическими выключателями. Расчет температур в обмотке и выбор оптимального числа шунтов выполнен Д.Л.Атертоном ^{/4/}, который также указал на следующие недостатки такого метода защиты:

1. Запасенная энергия выделяется внутри криогенной системы, что термодинамически менее выгодно, чем эвакуация энергии на наружные шунты.

2. Шунты ухудшают зарядные характеристики магнитов, так как ограничивают скорость ввода тока, вызывают появление дополнительных токов, которые увеличивают потери в обмотке и временно понижают однородность магнитного поля. Отключение шунтов во время запитки магнита с помощью внутренних выключателей устраняет эти недостатки, но усложняет конструкцию. Кроме того, требуется устройство защиты с внешним шунтом, действующее до замыкания внутренних выключателей.

3. Ограничение области применения случаями, когда даже при неравномерном распределении энергии по обмотке ее температура ни в одной точке не превышает допустимую.

Добавим к этому перечню низкую эффективность эвакуации энергии из самой обмотки, необходимость в большом количестве выводов из обмотки на шунты, оптимальное количество которых весьма велико (десятки, в примере, приведенном в /4/).

Таким образом, применение внутренних шунтов не является лучшим решением проблемы аварийной защиты сверхпроводящих магнитных систем.

В ряде других устройств защиты СМЭТ использованы известные методы эвакуации энергии. Например, в экспериментальном поезде на магнитной подушке /5/ магнит (0,5 кА; 0,12 МДж) снабжен механическим ключом с контактным сопротивлением 10^{-6} Ом, обеспечивающим работу в РЭТ, и вторичной алюминиевой обмоткой, концы которой подключены к внутреннему шунту. Второй ключ и внешний шунт обеспечивают защиту в период зарядки магнита. Отличительной особенностью этого устройства является удачное расположение вторичной обмотки — она полностью охватывает сверхпроводящую, обеспечивая хорошую магнитную связь и, следовательно, высокую эффективность эвакуации энергии. Однако не в любой магнитной системе это удастся сделать. Кроме того, наличие двух ключей и шунтов усложняет устройство.

Защита СМЭТ (0,12 кА; 0,14 МДж) Калэмской лаборатории (Англия) осуществлена с помощью сверхпроводящего ключа (200 Ом) и внешнего разрядного сопротивления (3,3 Ом) (см. /6/, с.537-542). Второй, механический ключ также, как и в предыдущем устройстве, обеспечивает отсоединение источника электропитания, если необходимость эвакуации возникает в период ввода (или вывода) тока в магнит.

Подводя итог вышесказанному, определим требования, которым должно отвечать устройство защиты СМС ЗТ.

Устройство защиты должно обеспечивать эвакуацию запасенной в магните энергии как при вводе (и выводе) тока, так и в РЗТ. Для этого необходимо соблюдать следующие условия. Во-первых, традиционная сверхпроводящая перемычка (СП) должна быть заменена сверхпроводящим выключателем (СВ), имеющим достаточно большое сопротивление в нормальном состоянии и управление, которое обеспечивает переход выключателя в нормальное состояние (в течение нескольких миллисекунд) со скоростью, соответствующей требованиям данного случая. Во-вторых, электрическая схема должна быть построена так, чтобы устройство питания магнита не препятствовало эвакуации энергии. Последнее условие легко выполняется, когда магнит уже находится в РЗТ. Для этого на токовых вводах устанавливают разъемные контакты, а в некоторых СМС верхнюю часть токовводов после заряда магнита вообще вынимают из криостата ^{/7/}. Схеме электропитания и защиты в таком случае может быть выполнена так, как показано на рис.1а. Однако наибольшая опасность перехода магнита в нормальное состояние возникает при вводе в него тока, так как иногда не известно состояние системы при первом пуске, после предыдущей эвакуации энергии или перерыва в работе. На первый взгляд, простое решение заключается в установке дополнительного СВ последовательно с источником питания (рис.1б). Но при одинаковой с вариантом "а" эффективности эвакуации в этом случае для изготовления обоих СВ требуется в 4 раза больше сверхпроводящего материала. К тому же надежность СМС при использовании двух одновременно срабатывающих коммутаторов понижается.

Замена СВ в цепи источника питания коммутатором другого рода не улучшает положения.

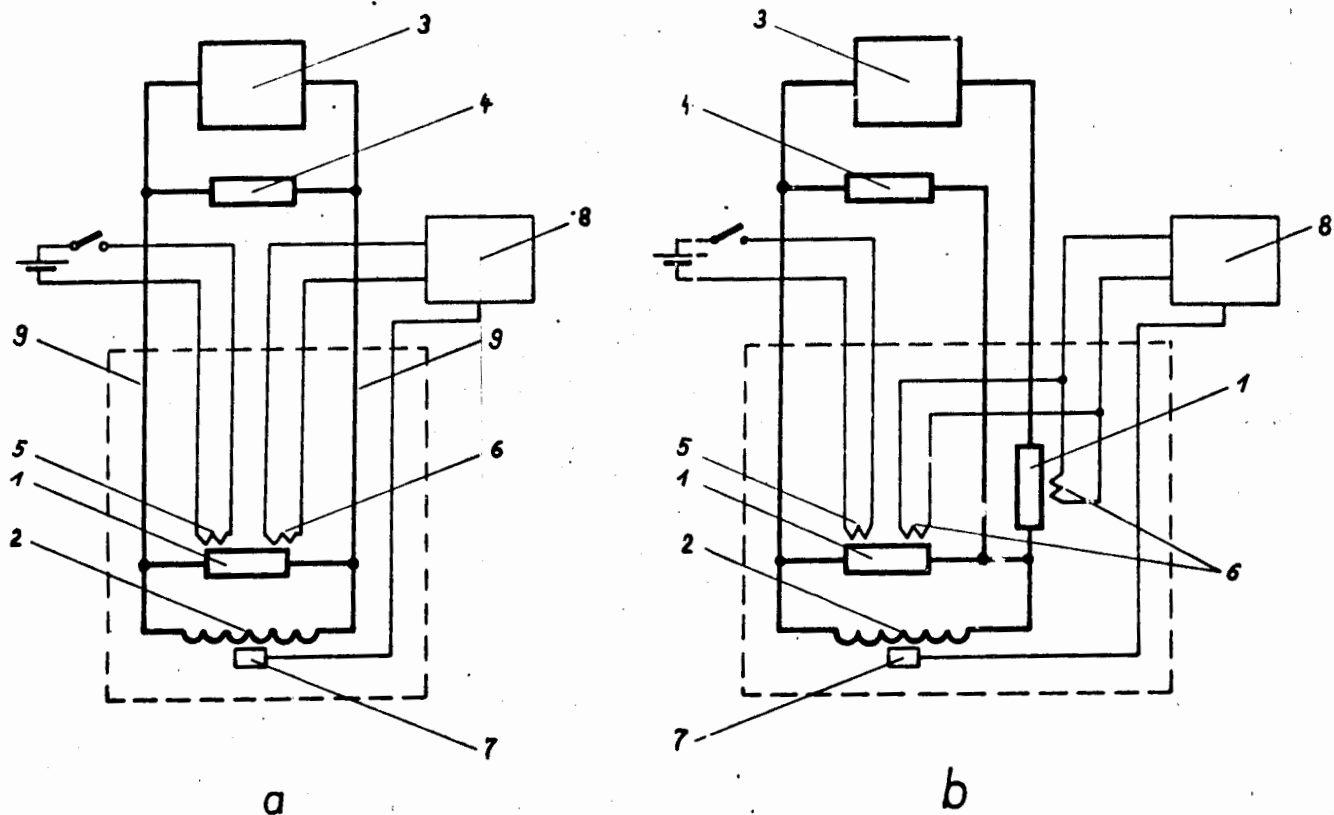


Рис. I. Схема питания и защиты сверхпроводящих магнитов с одним (а) и двумя (в) сверхпроводящими выключателями.

I - выключатель; 2 - магнит; 3 - устройство электропитания; 4 - защитное сопротивление; 5 - нагреватель СВ для ввода тока в магнит; 6 - импульсный нагреватель СВ; 7 - датчик перехода магнита в нормальное состояние; 8 - блок управления СВ; 9 - токовводы; (пунктирной линией обозначен криостат).

II. СХЕМА ЗАЩИТЫ СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ ПЕРЕМЫЧКОЙ И И ВЫКЛЮЧАТЕЛЕМ

В Криогенном отделе ОИЯИ предложена и осуществлена схема защиты, лишенная перечисленных недостатков. РЗТ создается с помощью СП и СВ, каждая из которых оснащена отдельным управлением. Величина сопротивления СП относительно невелика и выбрана из условий запитки магнита, сопротивление СВ определяется режимом эвакуации энергии. На рис.2 (толстые линии) представлена принципиальная схема такого устройства. К концам обмотки магнита I последовательно подсоединены СВ (поз.2) и СП (поз.3), а также защитное сопротивление 4, например, линейное или нелинейное активное сопротивление. К концам СП подключено устройство питания 5. На токовых вводах 6 могут быть установлены разъемные контакты, позволяющие прерывать теплоприток по вводам. Участок проводника между СП и СВ должен обладать полной криостатической стабилизацией, чтобы при нагреве СП в режиме запитки СВ не переходил в нормальное состояние. Таким образом, СВ как при изменениях тока (ввод и вывод), так и в РЗТ находится в сверхпроводящем состоянии. Перевод его в нормальное состояние с помощью, например, импульсного нагревателя осуществляется автоматически в любой момент по сигналам различных датчиков, в том числе датчика, регистрирующего появление нормальной зоны в обмотке магнита. Также возможна автоматическая эвакуация при переходе СП в нормальное состояние в РЗТ. Для этого напряжение на концах СП должно превысить максимальное напряжение при запитке.

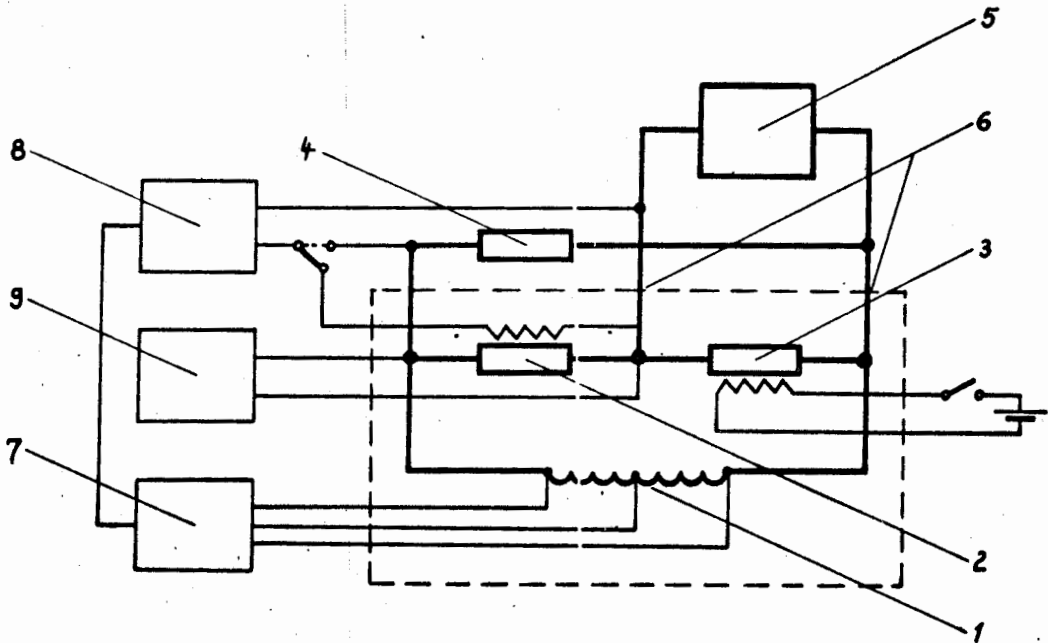


Рис.2. Схема питания и защиты сверхпроводящего магнита со сверхпроводящими перемычкой и выключателем. 1 - магнит; 2 - выключатель; 3 - перемычка; 4 - защитное сопротивление; 5 - устройство электропитания; 6 - токовводы; 7 - блок индикации нормального состояния магнита; 8 - блок управления СВ; 9 - осциллограф. (Пунктирной линией обозначен криостат, утолщенными - принципиальная часть схемы).

Как видно из вышесказанного, в описываемой схеме разделены пути питания и эвакуации энергии. Благодаря этому обеспечивается возможность выведения энергии из магнита в любой момент работы. Очевидно, что выбор типа СВ определяется в значительной степени конструкцией магнита и криостата. В настоящее время техника создания СВ достигла высокого уровня, что произошло, в основном,

благодаря разработке индуктивных накопителей энергии. Обмотки СВ изготавливают из ленточных и многожильных проводников. В последнем случае жилы могут быть заключены в эпоксидный компаунд /8/ или медно-никелевую матрицу /9/. Важным шагом в развитии СВ было использование ниобий-титановых фольг со сверхпроводящими экранами /10/ и без них /15/.

III. СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ И ЗАЩИТЫ

Для проверки рассматриваемой схемы электропитания и защиты использована СМС, созданная в Криогенном отделе ОИЯИ /II/ и содержащая соленоид с высокой однородностью поля (см.рис.3).

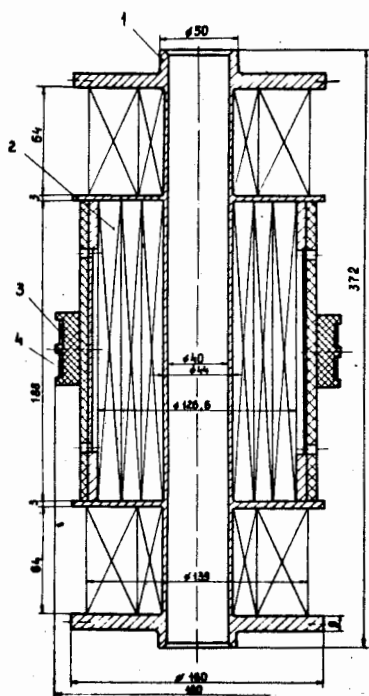


Рис.3. Сечение соленоида, перемычки и выключателя.
1 - каркас соленоида;
2 - секционированная обмотка; 3 - перемычка;
4 - выключатель.

Основные параметры узлов стенда приведены в таблице. Следует отметить, что соленоид имеет ряд важных особенностей. Во-первых, при его эксплуатации требуется автоматизированная система эвакуации энергии, так как критический ток в зависимости от скорости ввода тока колеблется в пределах $I_{30}+I_{50A}$, и при попытке достигнуть максимальной индукции соленоид часто переходит в нормальное состояние. Во-вторых, в обмотке существует не одна, как обычно, а несколько зон с состоянием, близким к критическому. Это объясняется методом конструирования, обеспечивающим комплексную оптимизацию размеров соленоида. При изготовлении соленоида использована разработанная в Криогенном отделе ОИЯИ /II/ программа расчета на ЭВМ оптимальных размеров секционированной обмотки соленоида с однородным магнитным полем.

Загружение сверхпроводников в отдельных секциях, то есть отношение критического тока секции к критическому току магнита, лежит в области $7I,5+100\%$ при расчетном критическом токе соленоида $I_{см} = I_{55A}$. Рациональное секционирование обмотки и подбор сечений сверхпроводников позволяет добиться значительной экономии сверхпроводника, по сравнению с его расходом в соленоидах с постоянной плотностью тока во всем объеме обмотки. Такая оптимизация является перспективной и изучение поведения подобных обмоток при эвакуации энергии представляется нам полезным.

В-третьих, межслоевая изоляция (2 слоя лавсановой пленки толщиной по 20 мкм каждый) при изготовлении проверялась напряжением 1 кВ, и принято решение вести эвакуацию при напряжении, не превышающем 0,5 кВ.

СП и СВ изготовлены из 3 параллельных сверхпроводников NIOMAX CN 25 фирмы IMI (Англия) (см.таблицу), которые уложены в кольцо из текстолита, находящееся на наружной поверхности соленоида в его срединной горизонтальной плоскости (см.рис.3).

Проверен тепловой способ управления СВ. Принципиальная электрическая схема стенда показана на рис.2. Нагревательный элемент СВ изготовлен из фольги толщиной 0,1 мм, материал сталь Х18Н10Т. Проволока СВ уложена бифилярно в два слоя, нагреватель охватывает СВ снаружи. Нагревательным импульсом является конденсаторный разряд, идущий через тиристор, который управляется или вручную или выходным сигналом устройства индикации. Последнее срабатывает, когда величина и длительность действия резистивного напряжения в магните превышают определенные пороги. В данных экспериментах эти пороги были выбраны в диапазоне от 50 до 100 мВ^ц от 1 до 10 мс. Для индикации резистивного напряжения использована мостовая схема с выводом средней точки магнита.* Устройство индикации разработано в ЭИ САН (Братислава, ЧССР) и производится Братиславским электротехническим заводом, некоторые сведения об этом приборе содержатся в /12/.

Переход магнита в нормальное состояние инициируется двумя способами: Превышением критического тока или нагревом обмотки. Нагреватель намотан как дополнительный слой во внутренней корректирующей секции соленоида.

На светолучевом осциллографе К П5 во время эвакуации измерялись следующие величины: Напряжения на выключателе, переключке, датчике Холла, расположенном в центре магнита, ток через защитное сопротивление, напряжения моста и нагревателя в обмотке магнита.

*Позднее изготовлена и использована схема с вспомогательной катушкой (см.стр.16).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Сверхпроводящая перемычка.

Записи падения напряжения на концах СП, которые велись во время всех экспериментов по эвакуации, показали, что перемычка остается в сверхпроводящем состоянии в любом из осуществленных режимов (см.рис.4)

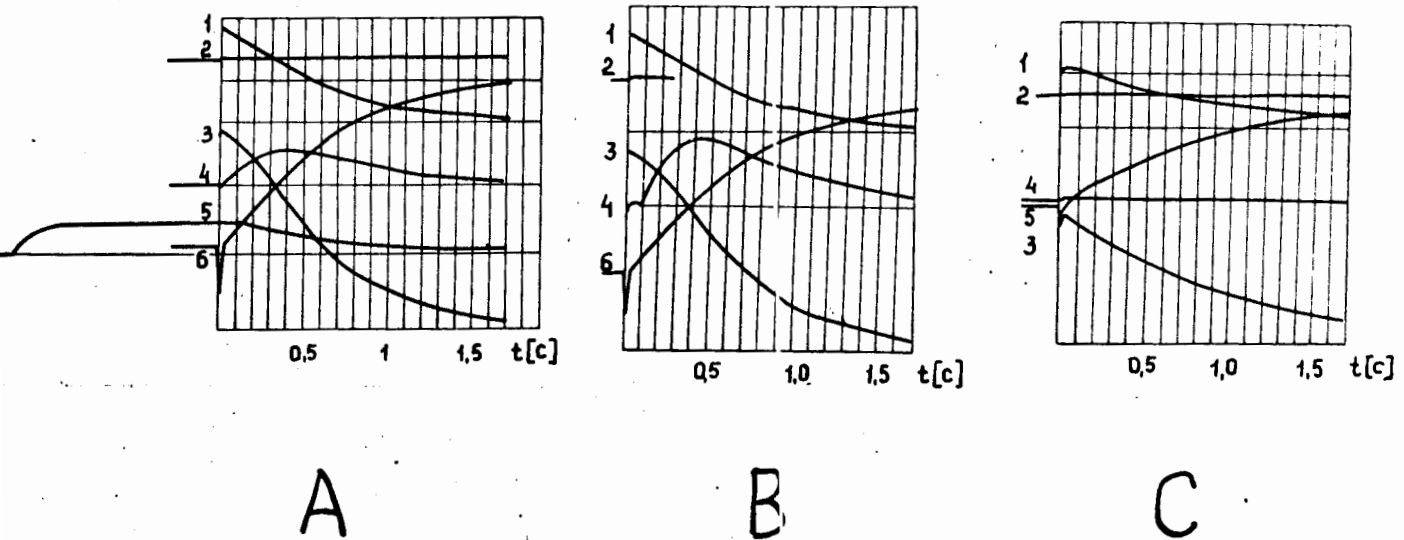


Рис.4. Копии осциллограмм в экспериментах по эвакуации. $R_p = 5,3 \text{ Ом}$.

А - с включением нагревателя в обмотке, $I_{MO} = 120 \text{ А}$; В - без включения нагревателя, $I_{MO} = 120 \text{ А}$; С - без включения нагревателя, $I_{MO} = 80 \text{ А}$.

1 - ток через защитное сопротивление (масштаб: (А, В, С - 7,8 А/мм); 2 - напряжение на перемычке (А, В - 4,5 В/мм); 3 - напряжение на выключателе (А, В, С - 19,8 В/мм); 4 - напряжение на "мосте", (А - 11,8 В/мм, В, С - 4,65 В/мм); 5 - напряжение нагревателя (А - 5 В/мм); 6 - ток магнита (А, В, С - 5,5 А/мм).

Таким образом доказано, что нормальная зона, возникающая в СВ или СМ, не распространяется в СП. Небольшая ступенька на осциллограмме в момент начала эвакуации появляется при токах, превышающих 100А, и величинах защитного сопротивления больших 2 Ом. Максимальное сопротивление СП в этих случаях составляет примерно 10 мОм, то есть порядка 1% номинального сопротивления перемычки. Такая резистивность СП не оказывает заметного влияния на процесс эвакуации.

4.2. Сверхпроводящий выключатель.

4.2.1. Энергия управления ≈ 15 Дж.

Скорость перехода выключателя в нормальное состояние достаточно велика, особенно при начальном токе магнита I_{MO} , близком к критическому значению I_{MC} - в последнем случае менее 1 мс (см.рис.5). Однако за этим скачком следует более медленный рост сопротивления, максимальное значение которого достигается через несколько десятых секунды (рис.6). Время переключения t_r (t_r - время с начала нагревательного импульса до достижения 90% конечного значения U_{sw} , t_d - время с начала нагревательного импульса до начала роста сопротивления R_{sw}) и максимальное сопротивление выключателя R_{sw} слишком сильно зависят от выбранных величин защитного сопротивления R_p и начального тока I_{MO} (рис.6). Кроме того, R_{sw} не достигает максимального сопротивления СВ, равного 43 Ом, а при малых R_p составляет лишь его незначительную часть. Это свидетельствует о недостаточном воздействии теплового управления на обмотку СВ. Нагреватель только инициирует переход на сравнительно небольшой длине, дальнейший рост R_{sw} зависит от скорости распространения нормальной области. Последняя, в свою очередь определяется I_{MO} и также R_p , так как ток делится

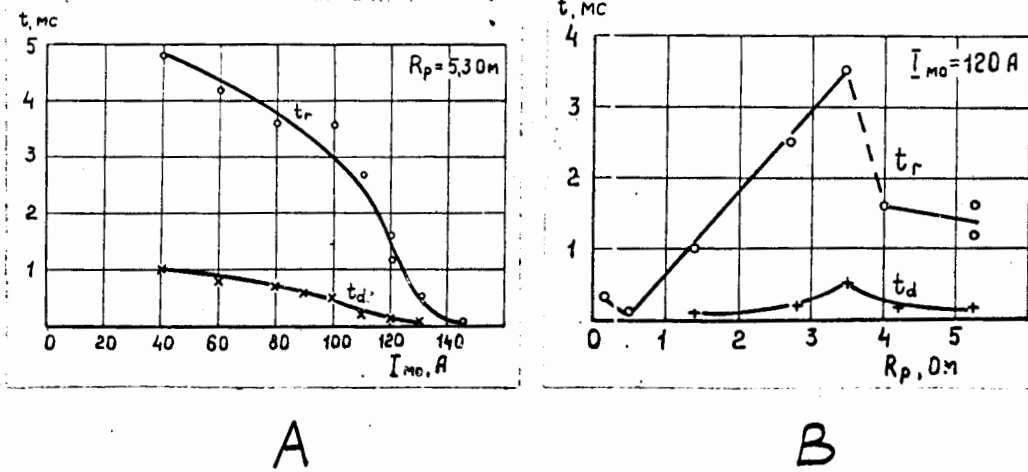


Рис.5. Зависимости времени запаздывания t_d и времени переключения t_z выключателя от начального тока I_{MO} в магните при постоянном защитном сопротивлении $R_p = 5,3 \text{ Ohm}$ (А) и от величины защитного сопротивления R_p при постоянном значении $I_{MO} = 120 \text{ A}$ (В). В обоих случаях энергия управления $\approx 15 \text{ Дж}$.

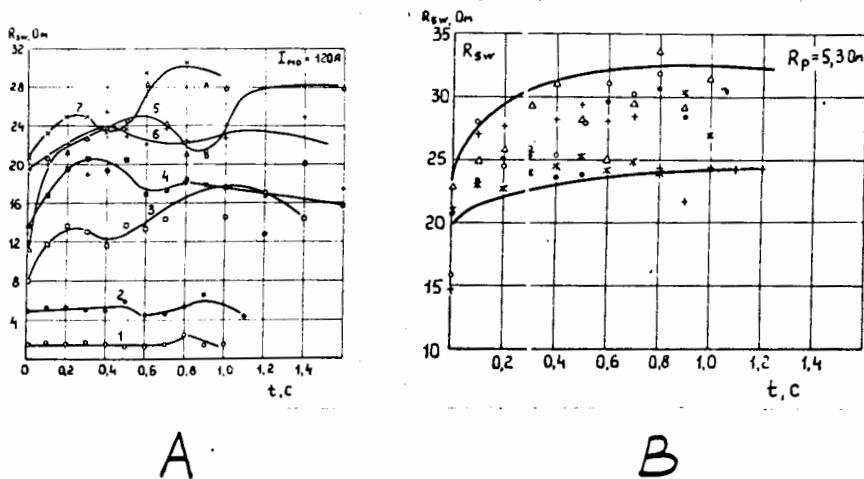


Рис.6. Рост сопротивления выключателя во времени после подачи управляющего импульса при: А - начальном токе магнита $I_{MO} = 120 \text{ A}$ и различных защитных сопротивлениях R_p ($1 - 0,14$; $2 - 0,5$; $3 - 1,4$; $4 - 2,7$; $5 - 3,5$; $6 - 4,0$; $7 - 5,3 \text{ Ohm}$); В - при различных значениях I_{MO} ($0 - 90 \text{ A}$; $+ - 100 \text{ A}$; $* - 110 \text{ A}$; $\bullet - 120 \text{ A}$; $\Delta - 130 \text{ A}$) и постоянной величине $R_p = 5,3 \text{ Ohm}$. В обоих случаях энергия управления $\approx 15 \text{ Дж}$.

между выключателем и защитным сопротивлением. Слабость нагрева связана с малой энергией конденсаторной батареи и с размещением нагревателя только на внешнем из двух слоев обмотки. Оба эти недостатка не являются принципиальными и в дальнейшем могут быть устранены. Следует также отметить, что соотношение R_{sw}/R_p и, следовательно, эффективность работы СВ даже растет с уменьшением R_p . Учитывая это и достаточное быстроедействие СВ, можно признать работу теплового управления удовлетворительной.

4.2.2. Энергия управления > 15 Дж.

В дальнейших экспериментах были повышены емкость конденсаторной батареи с 750 до 1250 мкф и энергия управления до 100 Дж (максимум). В результате сокращено время переключения t_2 СВ (рис.7) и существенно увеличены значения первоначального скачка сопротивления и конечного сопротивления R_{sw} . (рис.8). Однако попрежнему R_{sw} не достигало максимальной величины в 43 Ом.

4.3. Соленоид.

Обмотка соленоида, как и следовало ожидать ввиду одинаковой близости ее секций к критическому току, весьма легко и быстро переходит в нормальное состояние. Это затрудняет эффективную эвакуацию при I_{MO}/I_{MC} близких 1. Переход вызывается не только действием встроенного в обмотку нагревателя (рис.4А). Например, соленоид начал переходить в нормальное состояние примерно через 0,1 с после начала инициированной вручную эвакуации, при которой нагреватель в обмотке не включен, подается только импульс на тепловое управление СВ (рис.4В). Возможны две причины самопроизволь-

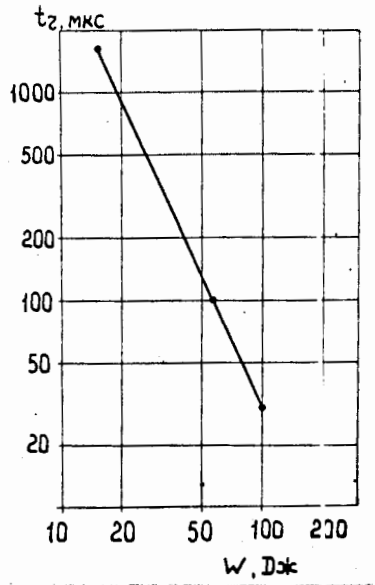


Рис.7. Зависимость времени перехода t_z СВ от энергии импульса управления ($I_{MO} = I_{20A}$; $R_p = 4 \text{ Ом}$).

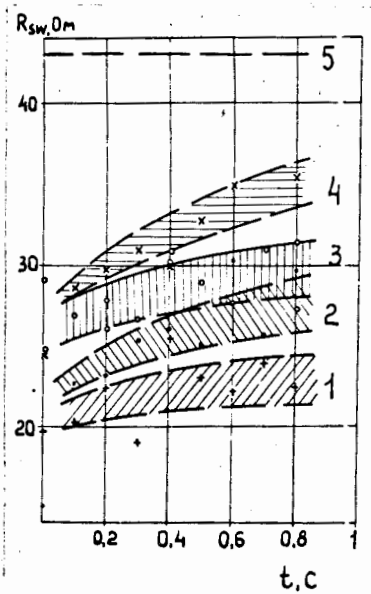


Рис.8. Рост сопротивления выключателя во времени после подачи управляющего импульса при $I_{MO} = I_{20A}$, $R_p = 4 \text{ Ом}$ и разных энергиях управления (1 - 15 Дж; 2 - 25 Дж; 3 - 56 Дж; 4 - 100 Дж; 5 - R_{sw} при полном переходе.)

ного перехода соленоида: 1. Нормальная зона, возникшая от действия управляющего импульса в СВ, распространяется в соленоид, несмотря на наличие участка стабилизированного проводника между ними. 2. Нормальная зона появляется в самой обмотке соленоида как результат действия потерь в проводнике, вызванных изменением магнитного поля и тока в начале эвакуации. При $I_{MO} \ll I_{MC} (\leq 80A)$ и $R_p \leq 5,3 \text{ Ом}$ соленоид остается в сверхпроводящем состоянии (рис.4С).

Возможны два объяснения отсутствия нормальной зоны в этом режиме: 1. Мала величина тока для обеспечения распространения нормальной зоны из СВ в соленоид. 2. Потери в обмотке соленоида недостаточны для нагрева какого-то участка обмотки выше температуры перехода.

Для ответа на вопрос о влиянии нормальной зоны в СВ на состояние соленоида поставлены эксперименты по эвакуации энергии из соленоида, работающего в обычном, некороткозамкнутом режиме. СП и СВ были отсоединены, коммутация тока проведена с помощью тиристорного выключателя. Падение напряжения в нормальной части соленоида измерено с помощью вспомогательной катушки, навитой из медной проволоки, установленной на торце соленоида и включенной вместе с обмоткой соленоида в мостовую схему. Характер самопроизвольного перехода соленоида (см., например, кривую I (рис.9,10) остался прежним.

То, что именно потери в обмотке являются причиной возникновения нормальной зоны, подтверждается наличием сильной зависимости длительности периода от начала эвакуации до перехода от скорости эвакуации в экспериментах с использованием СВ (см. рис.10).

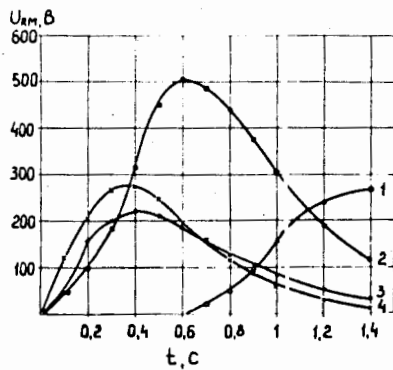


Рис.9. Изменение падения напряжения в нормальной части обмотки магнита в разных режимах эвакуации энергии с помощью СВ.

- 1 - $I_{MO} = 120$ А; $R_p = 1,4$ Ом, самопроизвольный переход.
- 2 - $I_{MO} = 120$ А; $R_p = 1,4$ Ом, нагрев обмотки.
- 3 - $I_{MO} = 120$ А; $R_p = 5,3$ Ом, нагрев обмотки.
- 4 - $I_{MO} = I_c = 144$ А; $R_p = 4$ Ом.

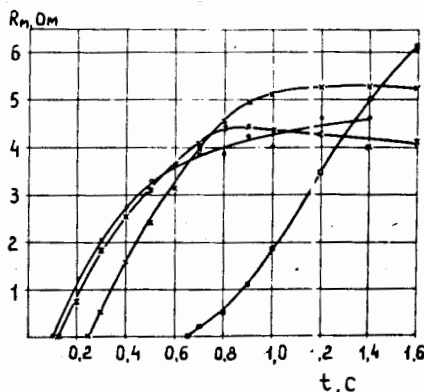


Рис.10. Изменение сопротивления обмотки магнита при эвакуации без нагрева обмотки (ручное управление СВ) при постоянном $I_{MO} = 120$ А и различных R_p .
 (□ - 1,4 Ом; X - 2,7 Ом; * - 4 Ом; ○ - 5,3 Ом)

При включении встроенного в обмотку нагревателя сопротивление соленоида R_m растет быстрее и достигает больших величин, чем в предыдущих случаях (рис. II). Начальная скорость роста R_m находится в пределах $3,5 \div 5$ Ом/с, что на два порядка выше значений, полученных при расчете роста сопротивления нормальной зоны за счет ее линейного распространения вдоль проводника в адиабатических условиях. (Методика такого расчета, подтвержденная экспериментальными результатами, приведена, например, в [14]). Это несовпадение скоростей объясняется, повидимому, быстрым распространением нормального состояния поперек слоев обмотки, так как нагреватель уложен в виде целого слоя одной из секций. Отметим, что в процессе некоторых режимов эвакуации dR_m/dt достигает ~ 20 Ом/с.

Рассмотрим поведение обмотки при эвакуации, вызванной достижением критического тока соленоида. Начальная величина $dR_m/dt \simeq 15 \div 20$ Ом/с (см. рис. I2). Это свидетельствует о том, что почти одновременно возникают несколько нормальных зон.

Сравнение процессов эвакуации показывает, что включение межслоевого нагревателя при $I < I_c$ позволяет имитировать поведение соленоида при его критическом токе. С другой стороны, такие аварийные ситуации при $I < I_c$, как поломка проводника, повидимому, лучше моделируются с помощью точечного нагревателя. Использование межслоевого нагревателя даст в этом случае пессимистический результат в отношении эффективности эвакуации.

Вследствие появления нормальной зоны в обмотке возникают значительные внутренние напряжения (рис. 9), которые существенно растут при уменьшении внешнего сопротивления R_p .

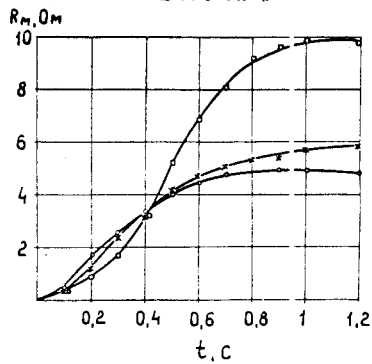


Рис.11. Изменение сопротивления обмотки магнита при эвакуации с предварительным нагревом участка обмотки при постоянном $I_{MO} = 0,8 I_C$ и различных R_p .
(\square - 1,4 Ом; \times - 4 Ом; \circ - 5,3 Ом).

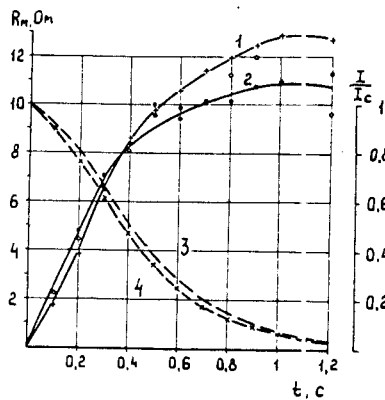


Рис.12. Изменение сопротивления обмотки магнита и тока магнита при эвакуации после достижения критического тока $I_C = 145$ А.
1 - $R_p = 3,5$ Ом; 2 - $R_p = 4$ Ом;
3 - I/I_C при $R_p = 3,5$ Ом;
4 - I/I_C при $R_p = 4$ Ом.

4.4. Эффективность работы устройства защиты.

Назовем эффективностью работы устройства защиты η_p отношение доли энергии W_p , выделившейся в защитном сопротивлении, к энергии W_{mo} , запасенной в магните: $\eta_p = (W_p / W_{mo}) \cdot 100\%$. На рис.13А показана зависимость η_p от величины R_p при инициировании начала перехода обмотки в нормальное состояние с помощью нагревателя и $I_{mo} / I_{mc} \approx 0,8$. Видно, что η_p очень низка при малых R_p и достигает 60% при $R_p = 5,3 \text{ Ом}$, что соответствует начальному напряжению эвакуации $U_p = 510\text{В}$. Дальнейшее повышение U_p связано с определенным риском. Отметим, что невысокая эффективность эвакуации объясняется самопроизвольным переходом обмотки в процессе эвакуации. Об этом свидетельствуют эксперименты с ручным инициированием начала процесса вывода энергии, без включения нагревателя. Даже в этом случае η_p невелика (см.рис.14) и возрастает до $\sim 95\%$ только при очень малых R_p . Однако использование низкоомных гасительных сопротивлений в аварийных ситуациях нерационального (рис.13), поэтому необходимо стремиться к максимально возможным R_p . Резервы находятся в повышении эффективности работы выключателя

$$\eta_{sw} = \left(1 - \frac{W_{sw}}{W_{mo}}\right) \cdot 100\% ,$$

которая при $R_p = 5,3 \text{ Ом}$ падает до 88% (см.рис.13). Для этого необходимо, во-первых, обеспечить полный переход СВ в нормальное состояние при любом режиме эвакуации. Во-вторых, требуется почти на порядок увеличить сопротивление выключателя.

Другой путь улучшения эффективности работы устройства состоит в переходе ^к эвакуации при $U_p = \text{const}$ в течение

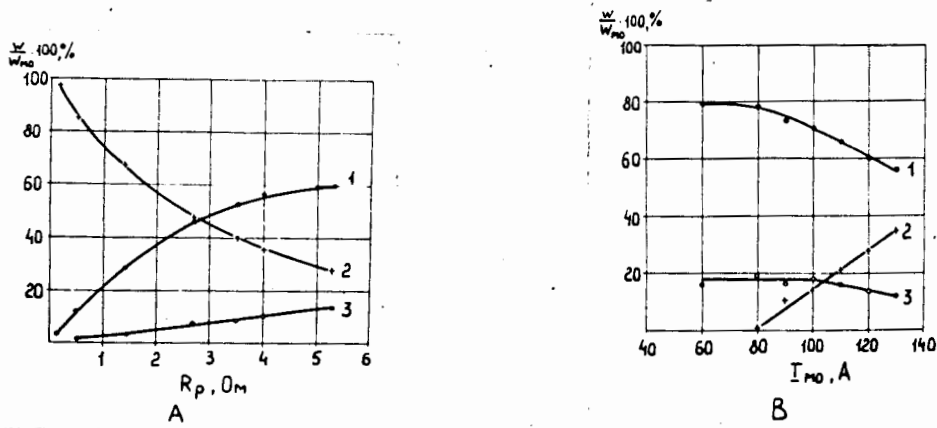


Рис.13. Зависимость долей энергии при эвакуации на защитное сопротивление от величины сопротивления R_p при постоянном $I_{MO} = 120$ А (А) и от I_{MO} при постоянном $R_p = 5,3$ Ом(В).

- 1 - $(W_p/W_{MO}) \cdot 100\%$;
- 2 - $(W_M/W_{MO}) \cdot 100\%$;
- 3 - $(W_{SW}/W_{MO}) \cdot 100\%$.

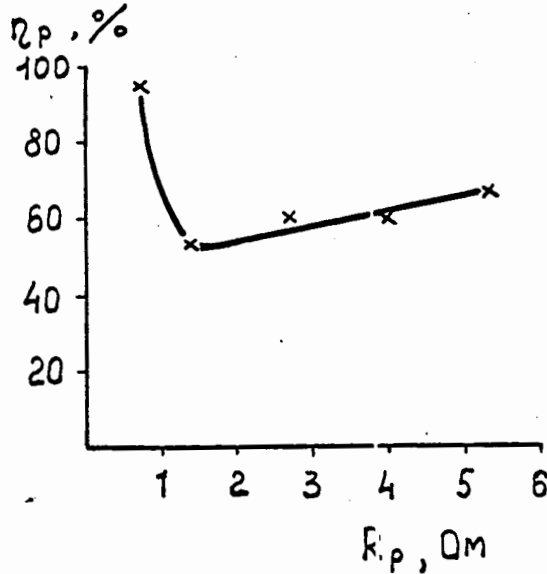


Рис.14. Эффективность эвакуации η_p при $I_{MO} = 120$ А и ручном включении процесса вывода энергии.

всего периода спада тока (см /13/). В этом случае эвакуация заканчивается гораздо быстрее, чем при разряде на защитное сопротивление, и тепловыделения транспортного тока в соленоиде будут соответствующим образом сокращены. Однако в 2 раза возрастут потери в СВ (при одинаковых начальных напряжениях эвакуации) /14/. Кроме того, следует ожидать увеличения потерь в соленоиде от вихревых токов.

Эффективность работы предложенной схемы в случае применения ее для не столь "метастабильных" обмоток может быть весьма высокой. Об этом свидетельствует рост η_p с уменьшением I_{MO} , показанный на рис. 13В.

Попутно отметим, что максимально полная эвакуация запасенной энергии важна не только для экономии жидкого гелия, упрощения газовых предохранительных устройств и предотвращения чрезмерного нагрева обмотки. При неэффективной эвакуации падение напряжений в обмотке может превысить напряжение эвакуации ^(рис. 9) (при $\eta_p = 50\%$ эти напряжения равны) и вызвать пробой электрической изоляции.

5. ВЫВОДЫ

1. Предложена новая схема электропитания и защиты сверхпроводящих магнитов, работающих в режиме "замороженного тока". Благодаря использованию сверхпроводящих перемычки и выключателя разделены пути питания и эвакуации, что обеспечивает 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.

3. Получены экспериментальные данные о поведении при переходе в нормальное состояние и эвакуации энергии оптимизированного лабораторного соленоида, содержащего семь секций с высокой плотностью тока. Причем критические состояния всех секций достигаются приблизительно одновременно. Развитие нормальной зоны в подобных обмотках происходят очень быстро, что требует особо внимательного подхода к конструированию устройств защиты и изоляции обмоток.

Шенков
Кидманн

ТАБЛИЦА

основных параметров лабораторной СМС

Наименование параметров	Размерность	Величина параметра
<u>Соленоид</u>		
Внутренний диаметр обмотки	м	0,044
Критический ток	А	130±150
Максимальная запасенная энергия при	кДж	~ 50
Количество секций		7
Плотность тока в секциях обмотки	А/см ²	0,8±2,3·10 ⁴
Диаметры проводников (НТ-50, многожильные, КЗ 50%)	мм	0,70;0,85;1,20
Индукция в центре В _{ос}	Т	~ 8
Индуктивность (расчетная)	Г _н	4,8
Сопротивление нагревателя в обмотке	Ом	200
<u>Переключка</u>		
Диаметр проводника (НТ в медно-никелевой матрице)	мм	0,25
Диаметр жилы	мкм	20
Сопротивление при ИОК	Ом	4,2
Мощность нагревателя	Вт	~ 1,5
Критический ток	А	200
<u>Выключатель</u>		
Диаметр проводника (НТ в медно-никелевой матрице)	мм	0,25
Диаметр жилы	мкм	20
Количество проводников		3

Наименование параметрsv	Размерность	Беллчнна параметра
Сопротнвлелне при IOK	Om	4I
Сопротнвлелне при IOOK	Om	43
Крнтческнй ток	A	200
<u>Управление</u>		
Емкость конденсаторной батареи	мкФ	750 ÷ 1250
Максимальное напряжение	B	500
Сопротнвлелне подогревателя при термическом управлении	Om	0,38
<u>Защитное сопротивление</u>		
(проволока из стали X18H10T)	Om	0,14 + 5,3

СОКРАЩЕНИЯ

СМС - сверхпроводящая магнитная система.

СМ - сверхпроводящий магнит.

СП - сверхпроводящая перемычка

СВ - сверхпроводящий выключатель

РЗТ - режим замороженного тока.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

I - сила тока

R - величина сопротивления

t - время

U - разность потенциалов

W - энергия

η - эффективность эвакуации энергии

ИНДЕКСЫ

С - критический

d - запаздывание

М - магнит

О - начальный

Р - защитный

ч - переход

SW - сверхпроводящий выключатель.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В.И.Курочкин и др. Универсальный лабораторный комплекс для получения магнитных полей с высокой однородностью с помощью сверхпроводящих магнитных систем. Труды IV Всесоюзного совещания по физико-химии, металлосведению и металлофизике сверхпроводников. Изд. "Наука", М., 1969, с. 145-151.
2. Дж.Уильямс. Сверхпроводимость и ее применение в технике. Изд. "Мир", М., 1973, с.195-197.
3. Сверхпроводящие машины и устройства. Изд. "Мир", М., 1977, гл.6.
4. D.L.Atherton "Theoretical treatment of internal shunt protection for superconducting magnets". J. Phys. E.: Sci.Instr., 1971, Vol. 4, pp. 653-659.
5. C.Albrecht et al. "Superconducting levitated systems: first results with the experimental facility at Erlangen". Proc. First Intern. Cryogenic Engin. Conf., Kyoto, 1974, pp. 28-34.
6. D.N.Cornish et al. "A 30 kG room-temperature aperture superconducting solenoid". Proc. Second Internat. Conf. Magnet Technol., Oxford, 1967, pp. 537-542.
7. T.Satow et al. "Removable current leads for superconducting magnets". Proc. Fifth Internat. Cryogenic Engin. Conf., Kyoto, 1974, pp. 403-405.
8. Х.Менке, Ю.А.Шишов. Модель сильноточного и высоковольтного сверхпроводящего выключателя. Препринт ОИЯИ Р8-7855, 1974. См. также тезисы докладов на конференции по техническому использованию сверхпроводимости, г.Алушта, 1975, Информэлектро, с.15.

9. H. Laquer et al. "Superconducting magnetic energy storage and transfer", Proc. Appl. Supercond. Conf., Annapolis, 1972, pp. 98-101.
10. В.А. Глухих и др. Сверхпроводящая сильноточная коммутационная аппаратура. Тезисы докладов на конференции по техническому использованию сверхпроводимости, г. Алушта, 1975, Информэлектро, с. 14-15.
11. Д. Касат. Методика расчета параметров сверхпроводящих секционированных соленоидов с высокой однородностью магнитного поля. Препринт ОИЯИ, Р8-10003, 1976.
12. L. Cesnak, J. Kokavec "Study of the propagation of the normal region in a superconducting solenoid". Cryogenics, vol. 12, 1972, April, pp. 116-120.
13. Н.Г. Анищенко и др. Усовершенствование и исследования устройств на основе автоматов гашения поля для эвакуации энергии из сверхпроводящих магнитных систем. Препринт ОИЯИ, 9-10006, 1976.
14. Х. Менке. "Расчет сверхпроводящих выключателей. Депонир. публ. ОИЯИ, Б1-8-10230. Дубна, 1976 г.
15. В.А. Глухих, А.И. Костенко, И.А. Моносзон, В.А. Тищенко, Г.В. Трохачев. "Результаты исследований сверхпроводящих ключей с высокой удельной разрывной мощностью. Препринт НИИЭФА, Б-0366, Л., 1977.