

С345с

М-505

Менке Х. и Шишов Ю. А.

5656/78



Б2-8-11968.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б2-8-11968

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1978

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высокой энергии

Х. Менце, В. А. Шиллов

Б2-8-11968

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ
ДЛЯ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ

Руководитель: [подпись]
В [подпись] [подпись]
... 25 ... окт. 1978

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Дубна, 1978 г.

АННОТАЦИЯ

Х. Мошис^{*)}, В. А. Шивов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ ДЛЯ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ

Разработан и испытан экспериментальный сверхпроводящий выключатель для устройств защиты сверхпроводящих магнитов. Выключатель изготовлен из ниобий-титановых жил, заключенных в эпоксидный компаунд. В зависимости от соединения четырех соэлектрических токов выключателя равен 950 или 1900 А, сопротивление, соответственно - 32, 8 Ом.

Проведены успешно эксперименты по эвакуации энергии из сверхпроводящего магнита на защитное сопротивление и дугогасительную решетку усовершенствованного автомата гашения поля.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

*) АВТОРЫ ИЛИ СОАВТОРЫ

*) Институт электротехники высоких мощностей, Берлин, ГДР.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для устройств защиты сверхпроводящих магнитных систем (СМС), используемых в ускорительной технике физики высоких энергий, необходимы надежные быстродействующие сильноточные коммутаторы. Наряду с другими типами коммутаторов возможно использование сверхпроводящих выключателей (СВ). Особенно важны СВ для сверхпроводящих магнитов (СМ), работающих в режиме "замороженного тока".

В Криогенном отделе ЛВЭ СИАИ в 1976 г. изготовлен и испытан экспериментальный СВ, ниобий-титановые жилы которого закреплены эпоксиным компаундом. Выключатель предназначен для продолжения изучения многожильных СВ без металлической матрицы, в том числе явления деградации критического тока I_C , поскольку при испытании образцов проводника и модельного выключателя, в котором впервые использована подобная технология ^[1], обнаружено значительное уменьшение I_C с увеличением длины проводника. Кроме того, требовался быстродействующий выключатель на ток до 1,5-2 кА в экспериментах по эвакуации с помощью дугогасительной решетки автомата гашения поля (АГП), снабженного плавной проволокой для поджига дуги непосредственного в решетке ^[2].

2. КОНСТРУКЦИЯ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Выключатель (см. таблицу 1, рис. 1 и 2) изготовлен из провода диаметром 0,7 мм, в медной матрице которого содержится 61 ниобий-титановая жила диаметром 65 мкм. Перед намоткой СВ медь вытравлена с помощью азотной кислоты. Провода сматаны в косу, содержащую 3 группы по 5 проводов. Шаг скрутки проводов в группе приблизи-

Таблица I. Параметры выключателя.

Материал сверхпроводника		HT-50
Диаметр жила	мм	65
Число жил в жосе		915
Длина жил в секции,		
внутренней	м	30
наружной	м	50
Количество секций		4
Внутренний диаметр выключателя	м	0,20
Наружный диаметр	м	0,29
Высота	м	0,40
Толщина секции	м	0,02
Критический ток секции	A	950
Сопротивление секции при \sim 10K,		
внутренней	Ом	6
наружной	Ом	10
Материал нагревателя		константан
Диаметр проволоки	мм	0,12
Сопротивление нагревателя в секции	Ом	1,25



Рис. 2. Схема выключателя:
1 - секция выключателя
2 - сверхпроводящий элемент
3 - нагреватель
4 - контактная группа



Рис.1. Сверхпроводящий выключатель,
~1900А, 8 Ом.

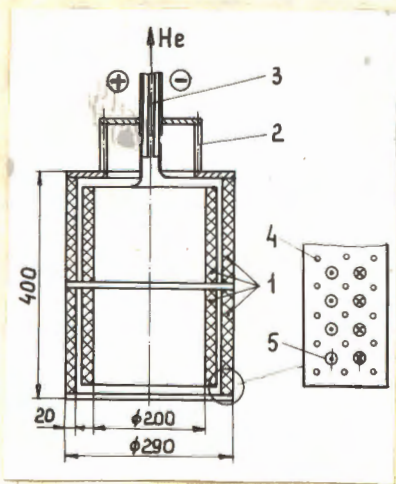


Рис.2. Сечение сверхпроводящего выключателя.
1 - сечение выключателя;
2 - подвеска; 3 - токовводы
4 - нагреватель; 5 - сверхпроводник, сматанный в носу.

тельно равен 10 см, шаг плетения группы в косе ~ 5 см. Скрутка и плетение необходимы для транспонирования проводов, которое обеспечивает более равномерное распределение тока между проводами. Для получения минимальной индуктивности СВ коса в каждой его секции намотана бифиларно, в два слоя. Термическое управление осуществляется с помощью проволочного нагревателя, уложенного между этими слоями. Пространство между жилами сверхпроводника и проволочными нагревателя заливается смолой ЭД5+10% ДЭГ-1 с холодным отвердителем марки ПЭПА и наполнителем в виде порошка нитрида бора (40% по весу).

Выключатель разделен на 4 секции, что дает возможность работы с магнитами, имеющими различные критические токи. Кроме того, повреждение проводника не приводит к выходу из строя всего СВ, достаточно заменить одну секцию.

3. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД

Принципиальная электрическая схема стенда показана на рис.3. Сверхпроводящий соленоид 1 расположен в криостате 2 внутренним диаметром 0,8 м, а выключатель 3 - в криостате внутренним диаметром 0,3 м. Параллельно СВ подключается либо защитное сопротивление 4, либо дугогасительная решетка 5, шунтированная плавкой проволокой. Источником электроэнергии 6 служит мотор-генератор. Критический ток соленоида равен 1,85 кА, индуктивность - 0,136 Г.

Устройство управления СВ состоит из батарей конденсаторов (1 мФ, 1 кВ), высоковольтного источника 8 для зарядки батарей и запирающего тиристора 9. Блок 10 управляет открытием тиристора 9 и запуском осциллографа 11, который регистрирует ток с помощью шунта 12 и падение напряжения на выключателе.

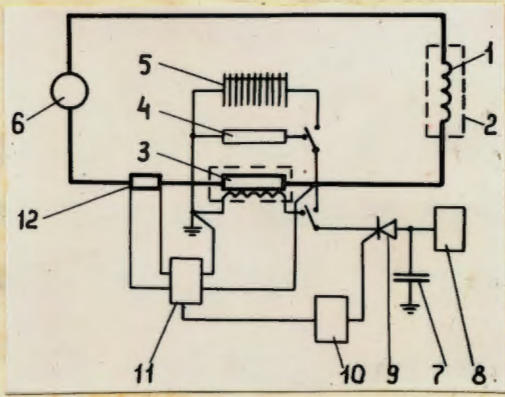


Рис.3. Принципиальная схема эвакуации энергии из СМС с помощью сверхпроводящего выключателя. 1 - сверхпроводящий соленоид; 2 - криостаты; 3 - сверхпроводящий выключатель; 4 - защитное сопротивление; 5 - дугогасительная решетка с плавкой проволокой; 6 - устройство питания; 7 - батарея конденсаторов; 8 - источник напряжения; 9 - тиристор; 10 - пусковое устройство; 11 - осциллограф; 12 - шунт.

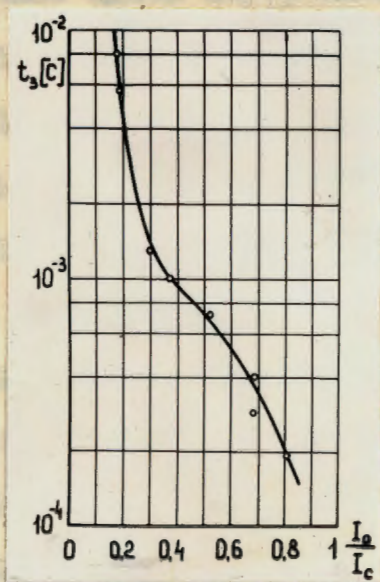


Рис.4. Зависимость времени запаздывания t_z от величины начального тока I_0 при тепловом управлении.

$$U_k = 1000 \text{ В.}$$

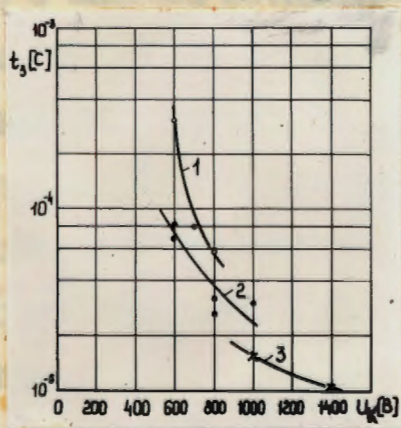


Рис.5. Зависимость времени запаздывания t_z от напряжения конденсатора U_k при электрическом управлении.

1 - $I_0/I_c = 0,1$;

2 - $I_0/I_c = 0,3$;

3 - $I_0/I_c = 0,5$.

Величина энергии управления, необходимая для нагрева сверхпроводника в выключателе до критической температуры, рассчитана по уравнениям, выведенным в работах /1,3/ и составляет $360 \div 720$ Дж. Напряжение батарей в этом случае должно быть равно $850 \div 1200$ В.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Критический ток и его деградация.

Для сравнения секций между собой измерены критические токи I_C отдельно одной внутренней и одной наружной секции. Эти I_C оказались близки и равны величине, полученной при последовательном соединении четырех секций - $I_C = 950$ А. Поэтому можно предположить, что I_C всех секций приблизительно одинаков. В экспериментах по эвакуации энергии из соленоида использован вариант соединения секций с сопротивлением $R_{св} = 8$ Ом (две последовательно, две параллельно), причем I_C не достигал 1900 А, повидимому, из-за неравномерного распределения тока между секциями.

Критическая плотность тока в сверхпроводящем выключателе j_c значительно меньше, чем у коротких образцов и в ряде других выключателей (см. таблицу 2). Повидимому, это уменьшение не-то связано с запылью металлической матрицы эпоксидным компаундом. Причины деградации в СВ такой конструкции не изучены, поэтому можно высказать лишь некоторые предположения. Например, из-за несовершенства технологии в матрице могут быть пустоты, а жилы недостаточно связаны с материалом матрицы, что приводит к ухудшению охлаждения отдельных участков жил. Более ясен механизм уменьшения I_C в результате электрической изоляции жил друг от друга (за исключением связи на концах секции).

Таблица 2. Сравнение параметров СВ.

Литература	Материал	I_c /кА/	$R_{св}$ /Ом/	J /Вт/м ³ /	J_c /А/м ² /
/1/ по данной работе	НТ-50 ^Н , \varnothing 65 мм в эпоксидном компаунде	0,92	2,6	$4,5 \cdot 10^{11}$	$0,83 \cdot 10^9$
	НТ-50 ^Н , \varnothing 65 мм в эпоксидном компаунде	1,9	8,0	$6,4 \cdot 10^{10}$	$0,31 \cdot 10^9$
/5/	НТ, \varnothing 25 мм	0,57	5,4	$7,8 \cdot 10^{11}$	$\sim 1,5 \cdot 10^9$
	в CuNi матрице	10	2,0	-	-
/6/	НТ, \varnothing 7 мм в CuNi матрице	1,4	6,5	$2,0 \cdot 10^{12}$	$\sim 2,4 \cdot 10^9$
/8/	Фольга НТ ^{НН} толщиной 20 мкм	макс. 2,7 миним. 2,49	50	$1,87 \cdot 10^{13}$ $1,6 \cdot 10^{13}$	$5,4 \cdot 10^9$ $5,0 \cdot 10^9$
	Фольга НТ толщиной 20 мкм, образец шириной 5 мм с двумя сверхпроводящими краями	1,2	-	-	$12 \cdot 10^9$

*) $\rho \approx 7 \cdot 10^{-7}$ Ом.м при 20 К - по данной работе.

**) $\rho \approx 6,4 \cdot 10^{-7}$ Ом.м при 20 К /8/.

J_c - критическая плотность тока в сверхпроводнике.

Первая из возможных причин деградации состоит в неравномерном распределении тока между параллельно уложенными проводниками. Однако с помощью дополнительных токовыводов измерены I_c некоторых проводов индуктатора. Найдено, что их $I_c = 67 \pm 73$ А, что лишь немногим больше, чем средний I_c провода в секции (I_c провода $= \frac{I_c \text{ секции } 950 \text{ А}}{15} = 63,3 \text{ А}$). Таким образом показано, что распределение тока между проводниками достаточно равномерно.

Проанализируем работу одного провода. Все экспериментальные данные о J_c образцов провода, модельного выключателя и рассмотряемого СВ свидетельствуют о большой зависимости J_c от длины провода l (рис.6). Связки потока, которые играют заметную роль ввиду неполной внутренней стабилизации или диаметром 65 мм, должны были бы снижать J_c или, при ее испытании в виде отдельного образца. Однако измерения показали, что в широких пределах длины или $l = (10^{-2} + 1)$ м $J_c \approx 8 \cdot 10^9 \text{ А/м}^2 \approx \text{Const}$. Кроме того, образцы проводов с более тонкими жилами диаметром 25 мм обнаруживают ту же зависимость $J_c(l)$, которая показана на рис.6. Можно предположить, что под влиянием разницы взаимной индуктивности или ток при входе распределяется неравномерно, а обмен током между жилами, который обычно происходит через проводящую матрицу, в данном случае невозможен. Покажем, что это приводит к снижению I_c с увеличением длины провода при достаточно длительном времени наблюдения, или, точнее, чрезмерному росту длительности установившегося равномерного распределения тока.

Рассмотрим упрощенную схему многожильного провода с непроводящей матрицей (рис.7). В каждой из n внутренних жил протекает ток i_1 , в m внешних, соответственно, i_2 . Суммарный ток в проводе

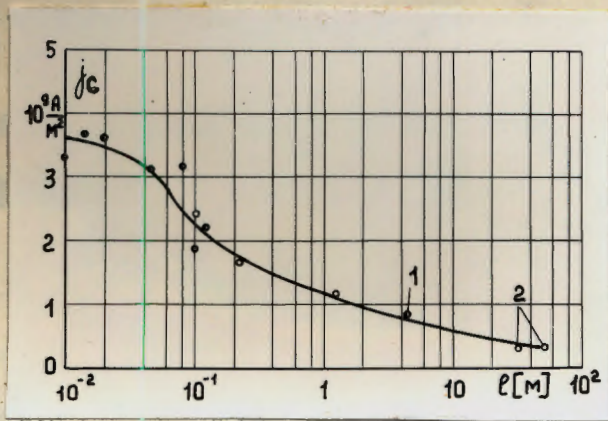


Рис.6. Зависимость критической плотности тока j_c от длины провода без медной матрицы
 • 19 μm ; ○ 61 μm ; 1 - модельный ингибитор // / ;
 2 - ингибитор по данной работе.

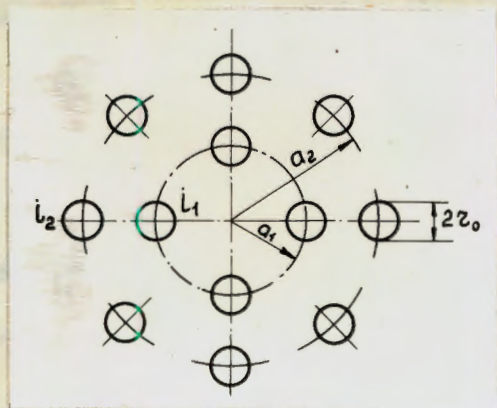


Рис.7. Упрощенная модель многожильного провода с непроводящей матрицей.

$$i = ni_1 + mi_2.$$

Индуктивность L и взаимная индуктивность жил M зависят по [4] от длины провода l следующим образом:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} l \left(\ln \frac{2l}{z_0} - \frac{3}{4} \right),$$

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} l \left(\ln \frac{2l}{a} - 1 \right),$$

где a - расстояние между жилами, z_0 - радиус жил.

Нарастание токов по времени выражается в виде:

$$i_1 = \frac{U}{R} \left(1 + K_1 e^{-t/\tau_1} + K_2 e^{-t/\tau_2} \right),$$

$$i_2 = \frac{U}{R} \left(1 + K_3 e^{-t/\tau_1} + K_4 e^{-t/\tau_2} \right).$$

Здесь τ_1 и τ_2 - сложные функции L, M, R ; K - постоянные, U - напряжение, приложенное к концам провода; R - сопротивление входа тока в жилу в месте контакта провода с тоководами или с проводами других секций. Примем равенство R всех жил и величину $R = 10^{-8}$ Ом.

На рис. 8 продемонстрирован более быстрый рост тока во внешних жилах. При $t = t_1$ i_2 достигает I_c жилы, а i_1 еще мал. Для всего провода

$$I_c = ni_1(t_1) + m I_{сж}.$$

При равномерном распределении тока для провода

$$I_c = (n + m) I_{сж}.$$

Оценочные расчеты показывают, что для проводов длиной около 1 см постоянные времена τ_1, τ_2 и, следовательно, времена установления равномерности распределения тока оставляют несколько

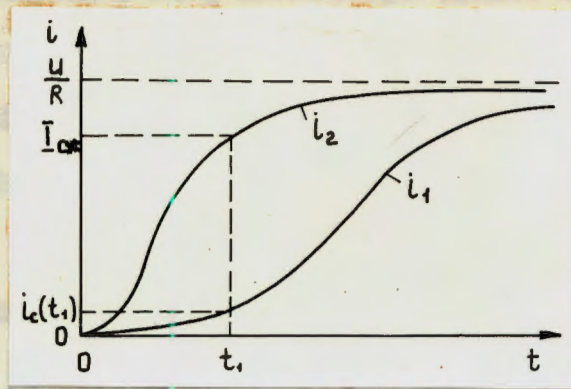


Рис.8. Рост тока по времени в многосильном проводе с непроводящей матрицей при вводе тока в выключатель.

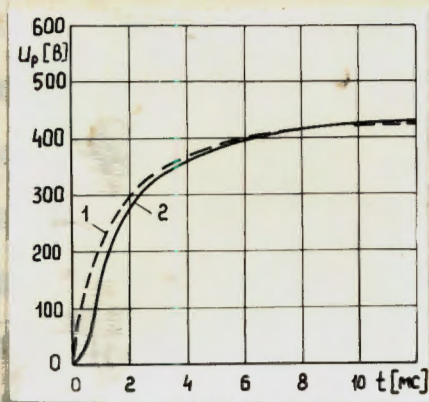


Рис.9. Изменение напряжения на защитном сопротивлении по времени при термическом управлении,

$R = 0,5 \text{ Ом}; I_c = 1100 \text{ А.}$

1 - расчетное; 2 - экспериментальное.

секунд. Другая картина получается при длине провода около 100 м, здесь τ_1 и τ_2 находятся в области $(10^3 + 10^5)$ с. То есть, равномерность в некоторых случаях может быть получена лишь за время, превышающее длительность наших экспериментов. О максимальной величине деградации можно составить представление, если принять, что весь ток протекает только по внешним жилам проводника (во внутренних жилах равен нулю). Тогда, например, для провода диаметром 0,7 мм с 61 жилой, $m = 24$, $n = 37$

$$\frac{I_{\min}}{I_{\max}} = \frac{m}{m+n} \approx 0,4.$$

В рассматриваемом СВ $j_c \approx 0,3 \cdot 10^9 \text{ Ам}^{-2}$ (см. таблицу 2), что даже по сравнению с $j_c \approx 3,5 \cdot 10^9 \text{ Ам}^{-2}$ коротких образцов без медной матрицы означает деградацию $\approx 0,088$. Таким образом, неравномерное распределение тока между жилами не объясняет полностью столь большое понижение j_c .

Скорость установления равномерного распределения тока в многожильном проводнике с непроводящей матрицей может быть повышена, например, чередованием участков с непроводящей и проводящей матрицами.

По нашим измерениям, образец с 4-ми участками без меди длиной 10 см каждый, разделенными участками с медью длиной по 2 см, имеет I_c , совпадающий с I_c образца без меди длиной 10 см. Однако технология изготовления СВ по такому способу довольно сложна. Другой путь состоит в обеспечении полного транспонирования жил. Здесь, помимо этого, также возможны различные конструктивные решения.

Приведем некоторые факты, которые могут оказаться полезными при дальнейшем исследовании причин деградации. Известно, что в жилах проводов с медной матрицей критическая плотность тока при направленности магнитного поля равной нулю $j_c \approx 10^{10} \text{ Ам}^{-2}$. По нашим измерениям, даже в самых коротких образцах с вытравленной матрицей плотность тока падает до $j_c \approx 3,5 \cdot 10^9 \text{ Ам}^{-2}$, то есть примерно в 3 раза. Это означает, что при удалении меди теряется какое-то важное свойство. Отметим также, что в данном СВ не проявился эффект тренировки. Это свидетельствует о стабильности механических свойств выбранного эпоксидного компаунда и, соответственно, об отсутствии новых трещин и перераспределения внутренних напряжений. Кроме того, измерения в одной из серий СВ показали, что сопротивление ее не менялось в течение длительного времени, то есть жилы не испытывают новых разрывов.

Поиск причин и преодоление значительной деградации многожильных СВ без металлической матрицы, несомненно, важны, так как подобные выключатели надежны, просты в управлении и не чувствительны к рассеянному магнитному полю.

4.2. Процессы перехода выключателя в нормальное состояние.

Важной характеристикой СВ является степень его перехода в нормальное состояние. Переход может быть неполным, если во время эвакуации энергии ток в СВ станет меньше тока распространения нормальной зоны I_p . При хорошем охлаждении провода I_p довольно высок, и скорость распространения может стать равной нулю прежде, чем весь СВ перейдет в нормальное состояние. В рассматриваемом случае жилы сверхпроводника хорошо теплоизолированы эпоксидной

матрицей и, по расчету, $I_p < 0,1 \cdot I_c$ /3/. Поэтому есть уверенность, что переход СВ будет полным. Сделанные в /3/ на основании этого предположения расчеты хорошо совпадают с данными эксперимента о изменении напряжения на защитном сопротивлении во времени (рис.9). Парастание сопротивления СВ $z_{св}(t)$ показано на рис.10. Видно, что при электрическом управлении сопротивление растет быстрее. Это означает, что число возникающих нормальных зон больше, чем при тепловой управлении.

Двумя другими характеристиками СВ, говорящими о быстродействии устройства защиты СМС, являются: 1 - время запаздывания t_3 , то есть период от подачи импульса управления до начала перехода СВ из сверхпроводящего в нормальное состояние; 2 - время полного перехода в нормальное состояние t_n , считая с момента начала перехода. Измерения показали, что даже при токах, значительно меньших I_c , при тепловом управлении $t_3 \leq 1$ мс (рис.4). Это вполне удовлетворительно для большинства устройств защиты СМС, применяемых в ускорительной технике. Значительно быстрее начинает переходить в нормальное состояние СВ при электрическом управлении $t_3 \approx 10$ мкс (рис.5).

Что касается времени полного перехода СВ в нормальное состояние t_n , то оно может быть довольно велико. Например, в случае $I_0 = 1,1$ кА ($I_0 = 0,58 I_c$), благодаря сравнительно малой скорости распространения нормальной зоны, величина t_n достигает десятков миллисекунд (см.рис.10).

С помощью рассматриваемого СВ приведены эксперименты с эвакуацией энергии из соленоида на защитное сопротивление и дугогасительную решетку АПГ, кунтированную плавкой проволокой

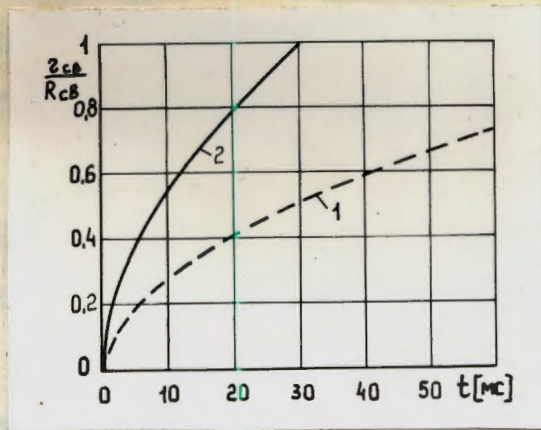


Рис.10. Изменение сопротивления выключателя во времени при эвакуации энергии из СВ; $R = 0,5 \text{ Ом}$, $I_0 = 1100 \text{ А}$.
 Параметры управления: $U_k = 1000 \text{ В}$, $C = 1000 \text{ мкФ}$.
 1 - термическое управление; 2 - электрическое.

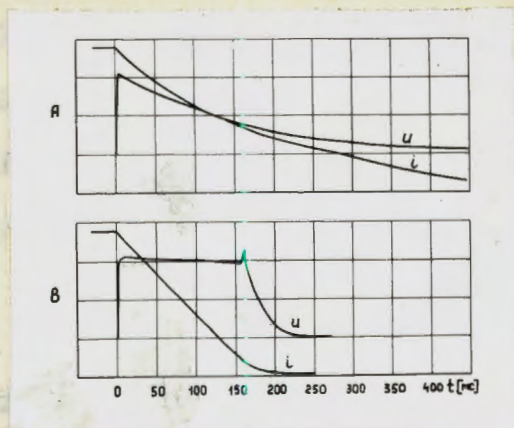


Рис.11. Осциллограммы тока i (200 А/деление) и напряжения u (230 В/деление) при эвакуации энергии из СВ с помощью СВ; $I_0 = 750 \text{ А}$. А - зашунтованное сопротивление; термическое управление СВ. В - автомат гашения поля; электрическое управление СВ.

(рис. II). При использовании АПН напряжение на релетке $U = \text{Const}$, а ток линейным образом спадает до нуля за время τ_0 . При $U = 460 \text{ В}$, $I_0 = 750 \text{ А}$ $\tau_0 \approx 175 \text{ мс}$. Постоянная времени изменения тока в период эвакуации на защитное сопротивление $\tau_{\text{защ}}$ должна совпадать в идеальном случае с τ_0 (при одинаковых начальных напряжениях и мгновенном переходе выключателя в нормальное состояние). В данном случае (рис. II) $\tau_{\text{защ}} \approx 200 \text{ мс}$. Разница получается из-за сравнительно медленного перехода СВ при термическом управлении: полное сопротивление достигается только через 100 мс (рис. IIA), при электрическом - через 30 мс (рис. IIB).

В одном из режимов эвакуации (при $I_0 = 750 \text{ А}$, $U = 500 \text{ В}$) получено время от подачи управляющего импульса на отключение СВ до появления дуги в релетке АПН не более 2 мс . Причем, собственное время перехода СВ $t_n \approx 70 \text{ мкс}$.

Таким образом, впервые в практике работы устройств защиты было осуществлено соединение в одном устройстве быстрой коммутации тока и эвакуации энергии при $U = \text{Const}$.

5. ВЫВОДЫ

I. Разработан и испытан экспериментальный сверхпроводящий выключатель для устройств защиты сверхпроводящих магнитов. Выключатель изготовлен из ниобий-титановых нил, заключенных в эпоксидный компаунд. В зависимости от соединения четырех секций критический ток выключателя равен 950, 1900 А, сопротивление, соответственно - 32, 8 Ом. Изучены некоторые причины деградации критического тока выключателей данной конструкции и намечены пути преодоления деградации.

2. Проведены успешные эксперименты с использованием выключателя по эвакуации энергии из сверхпроводящего магнита на защитное сопротивление и дутогасительную решетку, пунтированную плавкой проволокой. В одном из режимов эвакуации получено время от подачи управляющего импульса на отключение сверхпроводящего выключателя до появления дуги в решетке около 2 мс, а время перехода СВ 70 мкс. Таким образом, впервые осуществлено соединение в одном устройстве быстрой коммутации тока и эвакуации энергии при постоянном напряжении.

1. J. K. Storer, "Energy storage in superconducting magnets", *Proceedings of the IEEE*, vol. 57, no. 1, pp. 1-10, 1969.
2. J. K. Storer, "Superconducting energy storage systems", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 15, no. 2, pp. 77-79, 1979.
3. J. K. Storer, R. G. Kline, R. G. Kline, R. G. Kline, A. H. Hightower, "Requirements for the development of superconducting power systems", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 15, no. 2, pp. 100-104, 1979.
4. J. K. Storer, R. G. Kline, R. G. Kline, R. G. Kline, A. H. Hightower, "Superconducting energy storage systems", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 15, no. 2, pp. 105-109, 1979.
5. J. K. Storer, R. G. Kline, R. G. Kline, R. G. Kline, A. H. Hightower, "Superconducting energy storage systems", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 15, no. 2, pp. 110-114, 1979.

ЛИТЕРАТУРА

1. Х.Менке, Ю.А.Шиллов. Модель сильнотоочного и высоковольтного сверхпроводящего выключателя. Препринт ОИИИ, Дубна, Р8-7855, 1974. См. также труды конференции по техническому использованию сверхпроводимости. Алушта, 1975, М., Атомиздат, 1977, т.2, с.14-20.
2. Н.Г.Анциско, Х.Менке, Ю.А.Шиллов. Усовершенствование и исследование устройств на основе автоматов гашения поля для эвакуации энергии из сверхпроводящих магнитных систем. Препринт ОИИИ, Дубна, Э-10006, 1976.
3. Х.Менке. Расчет сверхпроводящих выключателей. Депонированная публикация ОИИИ, Дубна, В1-8-10230, 1976.
4. А.Вейс. "Übersicht über die theoretische Elektrotechnik". Akad. Verlagsges. Geest u. Portig, Leipzig, 1959.
5. H.L. Laguer. "Superconducting magnetic energy storage", Cryogenics, vol.15 (1975), 2, pp. 73-78.
6. K.Grawatsch, H.Kofler, P.Komarek, H.Kortmann, A.Ulbricht. "Investigations for the development of superconducting power switches", IEEE Transact. on Magn. Vol. MAG-11 (1975), 2, 596-9.
7. В.А.Глухих, А.И.Костенко, Н.А.Моносзон, А.М.Столлов, В.А.Тиченко, Г.В.Трошачев, Ю.В.Славов. Сверхпроводящая сильнотоочная коммутационная аппаратура. Труды конференции по техническому использованию сверхпроводимости. Алушта, 1975, М., Атомиздат, 1977, т.И, с.10-13.
8. В.А.Глухих, А.И.Костенко, Н.А.Моносзон, В.А.Тиченко, Г.В.Трошачев. Результаты исследований сверхпроводящих ключей с высокой удельной разрывной мощностью. Препринт НИИЭФА, Б-0366, Л., 1977.