

M-506

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



16/12-74

P8 - 7855

Х.Менке, Ю.А.Шишов

МОДЕЛЬ СИЛЬНОТОЧНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

1974

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

P8 - 7855

Х. Менке, Ю. А. Шишов

МОДЕЛЬ СИЛЬНОТОЧНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Направлено на XVIII всесоюзное совещание
по физике и технике низких температур,
Киев, 1974 г.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

1. ВВЕДЕНИЕ

Сверхпроводящие выключатели /СВ/ представляют собой безиндуктивную обмотку, снабженную устройством управления, которое переводит ее из сверхпроводящего в нормальное состояние. СВ используются для вывода энергии из индуктивных накопителей и аварийного удаления ее из сверхпроводящих магнитов /СМ/ /рис. 1/.

В связи с успешным развитием работ по индуктивным накопителям в ряде стран приступили к созданию многоамперных быстродействующих СВ. Во Франции /1/ исследуется работа различных выключателей, в том числе СВ с магнитным управлением, с помощью которого можно оканчивать разрядку накопителя в любой момент времени. Применена пленка из свинцово-висмутового сплава. В ФРГ /2/ начата разработка сверхпроводящих накопителей с выключателями теплового управления. Испытываются следующие материалы: Nb_3Sn , V_3Ga , NbN , $NbTi$ в виде ленты и тонких жил. В США /3/ построены выключатели с электрическим и магнитным управлением. Использован провод с ниобий-титановыми жилами, заключенными в медно-никелевую матрицу. Критический ток выключателя равен 0,8 кА, напряжение эвакуации - 1 кВ.

В криогенном отделе ЛВЭ ОИЯИ ведутся работы по созданию СВ, предназначенных для обеспечения аварийной эвакуации энергии из СМ постоянного и импульсного тока силой в 2 ÷ 3 кА при напряжении порядка 1 кВ. Для исследования работы СВ изготовлена модель, в которой применены жилы из ниобий-титанового сплава, заключенные в эпоксидный компаунд.

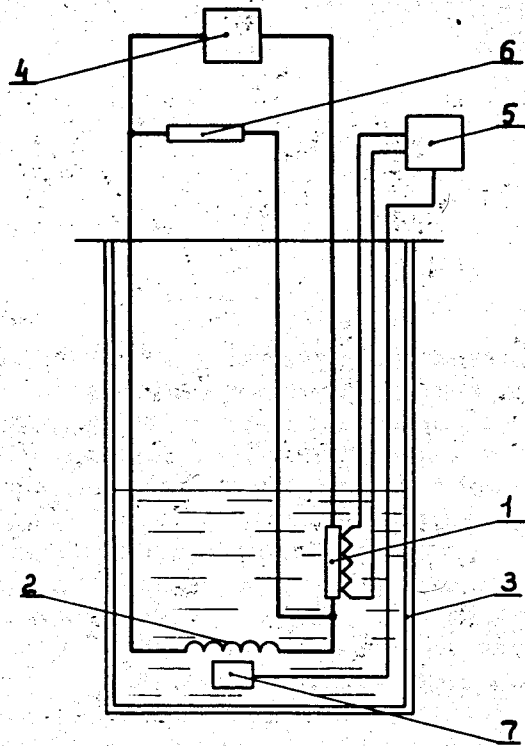


Рис. 1. Схема питания и защиты сверхпроводящих магнитов с помощью сверхпроводящего выключателя. 1 - выключатель; 2 - магнит; 3 - криостат с жидким гелием; 4 - устройство электропитания; 5 - блок управления выключателем; 6 - гасительное сопротивление; 7 - датчик перехода магнита в нормальное состояние.

В настоящей статье рассмотрены некоторые проблемы, возникающие при проектировании СВ, и способы их решения, примененные в модели. Дано описание конструкции модели, стенда для ее испытания и приведены экспериментальные результаты.

2. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

2.1. Способы управления выключателем

Известны три способа осуществления процесса перевода выключателя из сверхпроводящего в нормальное состояние.

1. Управление с помощью внешнего магнитного поля напряженностью $H > H_c$ /магнитный способ/.

2. Управление с помощью импульса дополнительного тока плотностью $j > j_c$ /электрический способ/.

3. Нагрев выключателя до температуры $T > T_c$ /тепловой способ/.

Рассмотрим преимущества и недостатки этих способов.

Управление с помощью магнитного поля связано с наибольшими трудностями, особенно при необходимости обеспечить короткое время перевода выключателя в нормальное состояние. Здесь требуются материал с низким H_c и малоиндуктивная обмотка, создающая магнитное поле. Эта обмотка занимает значительную часть объема выключателя. Низкое значение H_c препятствует размещению такого СВ в рассеянном магнитном поле. Преимущество этого способа состоит в отсутствии первоначального нагрева выключателя. Однако возможен нагрев выключателя за время длительной эвакуации энергии.

Электрический способ может быть осуществлен путем разряда через выключатель батареи конденсаторов. Время переключения из сверхпроводящего в нормальное состояние при этом очень мало. Однако при недостаточно высоких напряжениях управляющего импульса выключатель переходит в нормальное состояние частично, что уменьшает эффективность вывода. Для полного перехода необходимо применять конденсаторы с напряжением в несколько киловольт. В работе ^{/3/} экспериментально установлено, что напряжение, полностью переводящее выключатель в нормальное состояние, приблизительно равно произведению критического тока выключателя на его сопротивление в нормальном состоянии, т.е. $U \approx I_c \cdot R_B$.

По-видимому, наиболее простым является тепловой способ. При низких температурах теплоемкость материалов СВ весьма мала, и требуется небольшая порция энергии, вводимой с помощью нагревателя, чтобы нагреть выключатель выше температуры перехода. Для питания нагревателя могут быть применены сравнительно /с I_c / малые токи и низкие напряжения. Наиболее трудным вопросом, особенно при высоких напряжениях эвакуации и малых временах переключения, является обеспечение электрической изоляции между сверхпроводником и нагревателем. Это объясняется тем, что для осуществления быстрого нагрева сверхпроводника расстояние между ним и нагревателем должно быть минимальным, что приводит к возможности пробоя изоляции во время эвакуации энергии.

Поскольку работы над СВ начаты недавно и ведутся ограниченным кругом исследователей, окончательное решение вопроса о применимости того или иного способа является делом будущего.

Сделаем оценку величины энергии W_c , необходимой для нагрева выключателя до критической температуры

$$W_c = \int_{T_B}^{T_c} m C \cdot dT, \quad /1/$$

где T_B - температура ванны /4,2 К /; m - эффективная масса выключателя; C - удельная теплоемкость выключателя.

В области от 4,2 до $T_c \approx 10$ К удельные теплоемкости ниобий-титановых сплавов и оксидных смол близки между собой и пропорциональны квадрату температуры /4-6/

$$C \sim C_0 T^2 \quad /2/$$

$$C_0 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/г} \cdot \text{град}$$

Следовательно, после интегрирования

$$W_c = \frac{T_c^3 - T_B^3}{3} C_0 (\gamma_{CB} \cdot V_{CB} + \gamma_{\Theta} \cdot V_{\Theta}). \quad /3/$$

Здесь: T_c - температура перехода при $I=0$; C_0 - постоянная теплоемкости; γ_{CB} - удельный вес сверхпроводника; γ_{Θ} - удельный вес оксида; V_{CB} - объем сверхпроводника в выключателе; V_{Θ} - объем оксида, воспринимающий часть тепла в начале импульсного нагрева.

Объем оксида зависит от геометрических факторов и от его электрической прочности, особенно для высоковольтных выключателей. По измерениям, проведенным в криогенном отделе инженером Н.Г. Анищенко, для смолы ЭД-6+20%ДЭГ-1 с холодным отвердителем МТГФА и наполнителем в виде кварцевого песка $E=32$ кВ/мм. Очевидно, что такая прочность является вполне удовлетворительной при изготовлении выключателей на напряжение 1 кВ.

Коэффициент заполнения

$$K_{\Theta} = \frac{V_{CB}}{V_{CB} + V_{\Theta}} \quad /4/$$

$$W_c = \frac{T_c^3 - T_B^3}{3} \cdot C_0 \cdot \gamma_{CB} \cdot V_{CB} \cdot [1 + \frac{\gamma_{\Theta}}{\gamma_{CB}} (\frac{1}{K_{\Theta}} - 1)]. \quad /5/$$

По данным /4-6/ $\gamma_{\Theta} = 1,44 \text{ г/см}^3$, $\gamma_{CB} = 5,6 \text{ г/см}^3$.
В модельном выключателе $K_{\Theta} \approx 0,03 \div 0,05$.

$$\frac{W_c}{V_{CB}} = (2 \div 3) \cdot T_c^3 \cdot C_0 \cdot \gamma_{CB} \approx 0,3 \div 0,4 \text{ Дж/см}^3 \quad /6/$$

В принципе, для инициирования начала перехода выключателя в нормальное состояние достаточно меньшая, чем W_c , энергия W_{II} , которая нагревает выключатель до температуры перехода $T_{II}(I)$. Однако при появлении первых нормальных зон начинается деление тока между выключателем и гасительным сопротивлением, и могут создаться условия, когда новые нормальные зоны не появятся. Одновременно с уменьшением тока через выключатель снижается скорость распространения появившихся нормальных зон. В результате этих явлений выключатель переходит в нормальное состояние не пол-

ностью или с запозданием, и эффективность эвакуации энергии падает.

2.2. Выбор материалов

Для получения высокой эффективности вывода энергии из СМ с помощью СВ большое значение имеет выбор сверхпроводящего материала. Коэффициент полезного действия выключателя

$$\eta = 1 - \frac{W_B}{W_L} \quad /7/$$

W_B - энергия, которая теряется в выключателе; W_L - энергия, запасенная в магните.

Для идеального выключателя, то есть выключателя, мгновенно переходящего в нормальное состояние, при отсутствии потерь энергии в обмотке магнита и криостате:

$$\frac{W_B}{W_L} = \frac{1}{1 + R_B / R_{гас}} \quad /8/$$

R_B - сопротивление выключателя в нормальном состоянии; $R_{гас}$ - величина гасительного сопротивления.

Объем нужного для выключателя сверхпроводящего материала можно вычислить с помощью формул /7/ и /8/.

$$V_{СВ} = \frac{U_M \cdot I_c}{I_c \cdot \rho \cdot j_c^2} \cdot \frac{\eta}{(1 - \eta)} \quad /9/$$

U_M - максимальное напряжение эвакуации; I - номинальный ток; I_c - критический ток; ρ - удельное сопротивление сверхпроводящего материала при температуре, не намного превышающей критическую; j_c - критическая плотность тока в сверхпроводнике.

Важной характеристикой СВ является произведение ρj_c . Из материала, имеющего максимальное значение этого произведения, можно изготовить выключатель с минимальным количеством сверхпроводящего материала. Естественно, что такой выключатель будет обладать сравнительно небольшими размерами, и легче будет

$\rho \cdot j_c$ [А²/См]

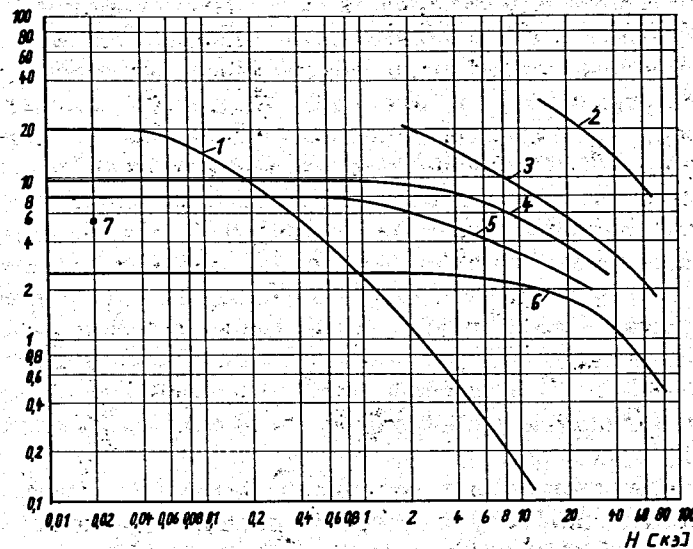


Рис. 2. Произведение $\rho \cdot j_c$ коротких образцов сверхпроводника в зависимости от напряженности магнитного поля. 1. Pb - 65% Bi, фольга толщиной 1-2 мкм /1/. 2. Nb-Ti в жидком гелии. Жилы диаметром 8 мкм /9/. 3. Nb-Ti в жидком гелии. Жилы 11 мкм /9/. 4. Nb-50%Ti в жидком гелии. Жилы 65 мкм. 5. Nb-50%Ti в пучине толщиной ~ 2 мм. Жилы 65 мкм. 6. Nb-Ti в жидком гелии. Жилы 76 мкм /10/. 7. Модельный выключатель. Nb-50%Ti жилы 65 мкм в эпоксидном компаунде /табл. 1/.

осуществлять перевод его в нормальное состояние. Из рис. 2 видно, что ниобий-титан в виде очень тонких жил /диаметром ≤ 10 мкм/ является наилучшим материалом, особенно при наличии рассеянных магнитных полей, как это имеет место при совместной работе СВ с СМ.

Для определения объема самого выключателя необходимо знать коэффициент заполнения его обмотки сверхпроводником и j_c обмотки. На эти вопросы может ответить практика конструирования и испытания модельных СВ.

Таблица 1: Параметры выключателя

Сверхпроводник	НТ-50, \varnothing 65 мкм
Длина косы	450 см
Число параллельных жил в косе	361*
Сопротивление выключателя выше T_c	2,5 Ом
Критический ток	920 А
Материал нагревателей	Константан, \varnothing 0,12 мм
Сопротивление нагревателя, предназначенного для ввода тока в магнит	65 Ом
Мощность нагревателя при вводе тока в магнит	0,6 Вт
Сопротивление импульсного нагревателя	100 Ом
Эпоксидная смола	ЭД-5 +10% ДЭГ-1
Отвердитель	ПЭПА
Наполнитель /40% по весу/	порошок нитрида бора
Средний диаметр выключателя	22 см
Толщина х высота	0,8 х 2 см ²
Индуктивность магнита	$0,3 \cdot 10^{-3}$ Г
Критический ток магнита	$4 \cdot 10^3$ А
Гасительное сопротивление	0,1 Ом

Результаты измерений представлены на рис. 4. По-видимому, имеет некоторый смысл удаление меди на участках длиной менее 2 см. Однако при этом уменьшается сопротивление провода, и нельзя ожидать существенного увеличения ρj_c . Кроме того, травление коротких участков сильно осложняет изготовление выключателя.

* Замечание: Жилы имеют обрывы; эффективное сечение около 60%.

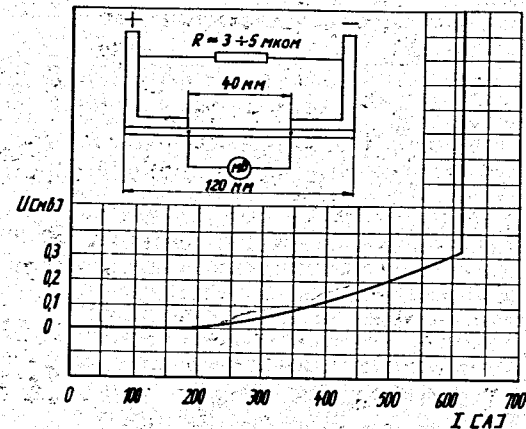


Рис. 3. Зависимость падения напряжения от силы тока на коротком образце провода диаметром 0,5 мм при переходе его в нормальное состояние. Жилы 65 мкм, напряженность магнитного поля $H = 0$ кЭ.

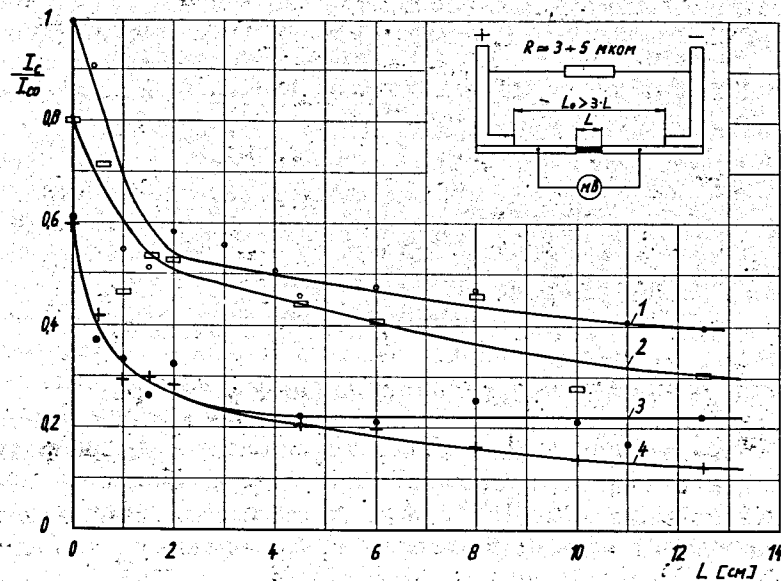


Рис. 4. Изменение критического тока коротких образцов провода диаметром 0,5 мм с 24 жилами 65 мкм в зависимости от длины участка L , на котором удалена медная матрица. I_{co} - ток полного перехода образца в нормальное состояние. 1 - жидкий гелий, $H = 0$ кЭ. 2 - азот, $H = 0$ кЭ. 3 - жидкий гелий, $H = 10$ кЭ. 4 - азот, $H = 10$ кЭ.

3. КОНСТРУКЦИЯ МОДЕЛИ

Выключатель изготовлен из провода диаметром 0,5 мм, содержащего 19 жил диаметром 65 мкм из сплава ниобий - 50% титана. Основные параметры выключателя и стенда для его испытаний даны в табл. 1. Провод изолирован двумя слоями лавсанового волокна. Перед намоткой провод опускается на длительное время в азотную кислоту, при этом медь вытравливается, а изоляция сохраняется /8/.

19 проводов длиной по 4,5 м каждый сплетаются в косу, в которой провода транспонированы для выравнивания их индуктивностей и, соответственно, более равномерного распределения транспортного тока. На каждую из трех групп проводов, составляющих косу, навита проволока нагревателя длиной около 6 м. Материал проволоки - константан, диаметр равен 0,12 мм. Проволоки включены параллельно, причем их сопротивление составляет приблизительно 100 Ом. Поверх косы намотан второй нагреватель /65 Ом/, предназначенный для медленного нагрева при вводе тока в магнит. Параллельно включенные нагреватели имеют сопротивление 40 Ом. Коса, состоящая из сверхпроводящих жил и проводов нагревателя, бифилярно укладывается в форму и заливается эпоксидным компаундом. Для улучшения охлаждения выключателя вблизи косы располагают с шагом 10 мм пластинки из медной фольги толщиной 0,25 мм и шириной 5 мм. Пластинки на 10 мм выступают из тела выключателя. Эпоксид проникает через волокна лавсана и занимает место вытравленной меди. Фотография шлифа опытного образца косы с проволокой нагревателя диаметром 0,25 мм показана на рис. 5. Измерение температуры выключателя ведется с помощью угольного датчика, имеющего сопротивление 100 Ом /1/10 Вт/. Датчик размещен вблизи косы и залит эпоксидом вместе с ней.

4. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД

Схема стенда, предназначенного для проведения исследований СВ, показана на рис. 6. Выключатель 1, под-



Рис. 5. Образец пропитки жил 65 мкм и лавсанового волокна эпоксидным компаундом. В середине проволока нагревателя.

соединенный к концам магнита 2, помещен в гелиевый криостат 3 внутренним диаметром 300 мм. Ток заводят в магнит с помощью источника питания 4 при включенном нагревателе 5. После отключения нагрева и охлаждения СВ магнит переводится в режим замороженного тока. Измерение напряженности магнитного поля осуществляется с помощью датчика Холла. Для уменьшения тепло-

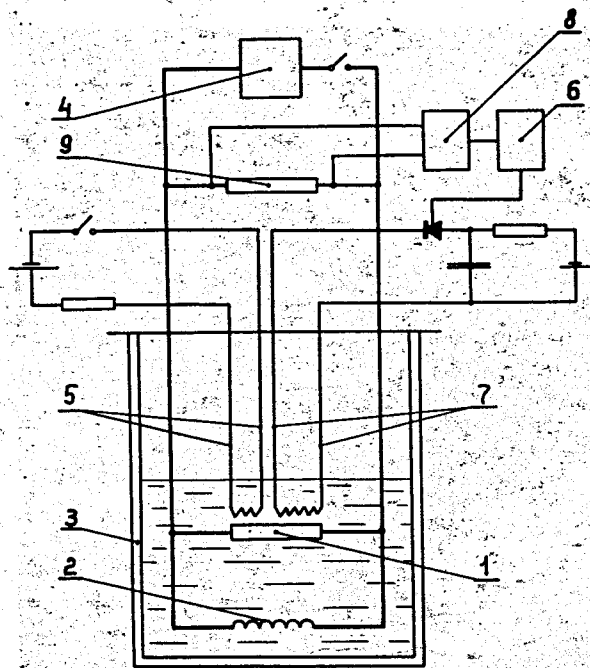


Рис. 6. Схема стенда для испытаний сверхпроводящих выключателей. 1 - выключатель, 2 - магнит, 3 - криостат с жидким гелием, 4 - устройство электропитания, 5 - цепь питания нагревателя, обеспечивающего ввод тока в магнит, 6 - пусковое устройство, 7 - цепь импульсного нагревателя, 8 - осциллограф, 9 - гасительное сопротивление.

притока в жидкий гелий при работе нагревателей, СВ помещен под колпак из текстолита. При нажатии кнопки на пусковом устройстве 6 происходит одновременное открытие тиристора в цепи импульсного нагревателя 7 и включение осциллографа 8, показывающего напряжение на концах гасительного сопротивления 9.

Номинальный ток выключателя равен 0,8 критического тока. Такое соотношение может обеспечить надежную работу выключателя в крупной СМС.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МОДЕЛИ

Получены следующие основные параметры модельного выключателя: критический ток 920 А, сопротивление в нормальном состоянии при $T > T_c$ - 2,5 Ом.

Эффект тренировки критического тока, как это обычно бывает в пропитанных эпоксидом обмотках магнитов, в модели не наблюдался. При многократных циклах нагрев - охлаждение сопротивление выключателя не менялось. Это свидетельствует о том, что в эпоксидном компаунде не возникают напряжения, которые могут привести к обрывам жил.

Время охлаждения выключателя до 4,2 К после прекращения работы нагревателя при вводе тока в соленоид составляет всего 10 сек.

Осциллограмма зависимости падения напряжения на концах гасительного сопротивления $R_{гас}$ от времени показана на рис. 7. В момент времени $t=0$ открывается тиристор и включается осциллограф. За время запаздывания t_3 импульсный нагреватель доводит выключатель до температуры перехода. С этого момента начинается рост напряжения. Через $t=t_3+t_M$ оно достигает максимума и затем падает с постоянной времени, определяемой индуктивностью магнита и величиной гасительного сопротивления.

Важным параметром выключателя является время запаздывания. В модели достигнута минимальная величина $t_3 \approx 0,2$ мсек при $I/I_c = 0,8$ /рис. 8/.

С помощью уравнения /6/ найдена энергия 4,5 Дж, необходимая для полного перевода выключателя в нормальное состояние. Такая энергия выделяется в импульсном нагревателе при напряжении конденсатора 150 В. Однако ясно, что для быстрого и полного переключения важна не только величина энергии импульса, но и его длительность.

Зависимость времени запаздывания t_3 от напряжения конденсатора показана на рис. 9. Устройство электронной части цепи нагревателя не позволяло поднять напряжение выше 300 В. Видно, что t_3 довольно велико и может

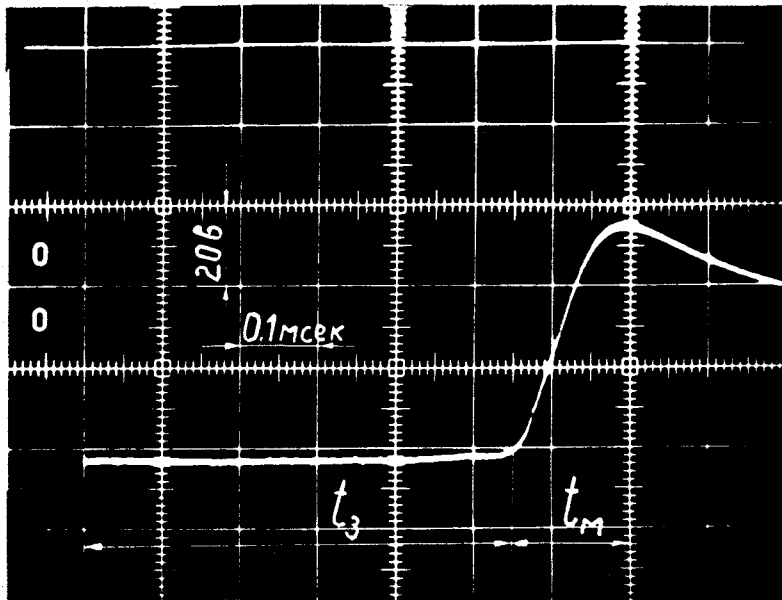


Рис. 7. Падение напряжения на гасительном сопротивлении в период эвакуации энергии из магнита. $U_H = 130 \text{ В}$, $I/I_c = 0,79$, $t_3 = 0,55 \text{ мсек}$, $t_M = 0,14 \text{ мсек}$.

быть уменьшено путем повышения напряжения конденсатора.

Время возрастания тока в гасительном сопротивлении от нуля до максимума t_M составляет $0,14 \text{ мсек}$ при $I/I_c = 0,87$ и сопротивлении нагревателя 100 Ом . В идеальном случае выключатель должен переходить в нормальное состояние мгновенно, то есть $t_M = 0$. По-видимому, в модели не была получена достаточная мощность нагрева. Об этом говорит следующее обстоятельство. Мощность нагревателя /при постоянном напряжении конденсатора/ обратно пропорциональна его сопротивлению. Уменьшение R_H до 40 Ом привело к $t_M = 0,14 \text{ мсек}$ уже при $I/I_c = 0,8$. Максимум тока через гасительное сопротивление в этом случае выше, чем при $R_H = 100 \text{ Ом}$ /рис. 10/. Коэффициент полезного действия для $I/I_c = 0,8$, полученный с помощью осциллограммы, $\eta \approx 0,85 \div 0,9$.

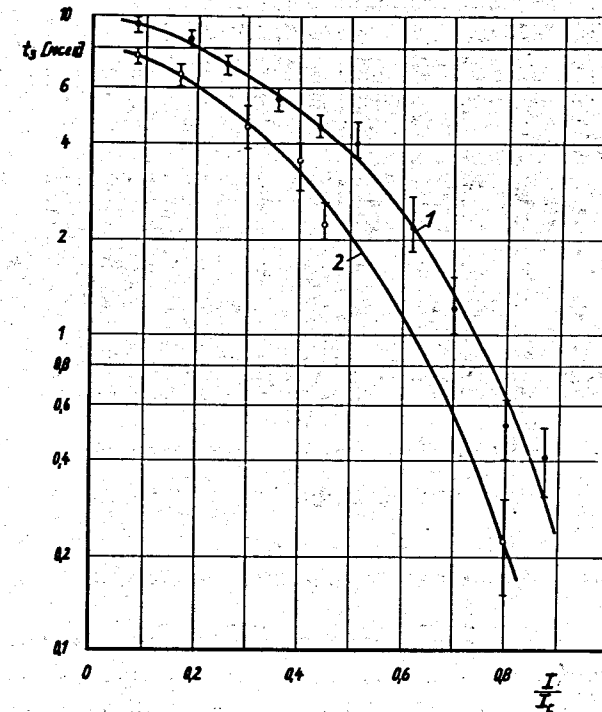


Рис. 8. Зависимость времени запаздывания t_3 от силы транспортного тока. $R_H = 40 \text{ Ом}$, $C_H = 400 \text{ мкФ}$, 1 - $U_H = 150 \text{ В}$; 2 - $U_H = 300 \text{ В}$.

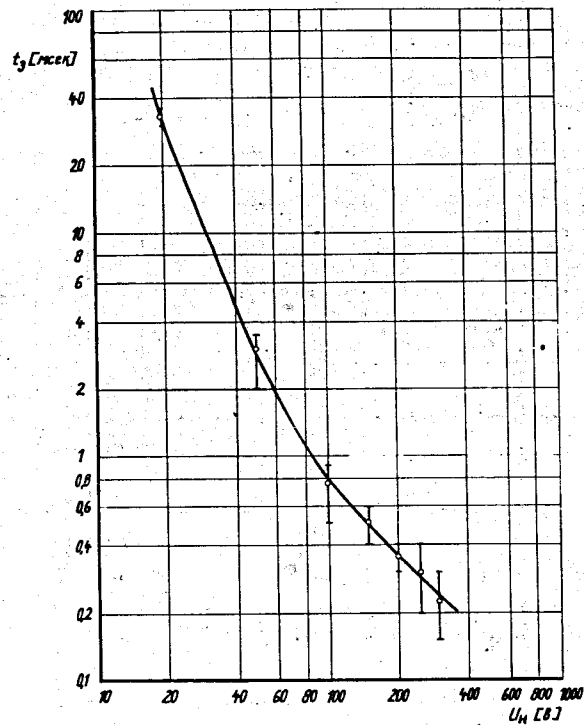


Рис. 9. Зависимость времени запаздывания t_3 от напряжения нагревателя. $I / I_c = 0,8$; $R_H = 40 \text{ Ом}$; $C_H = 400 \text{ мкФ}$.

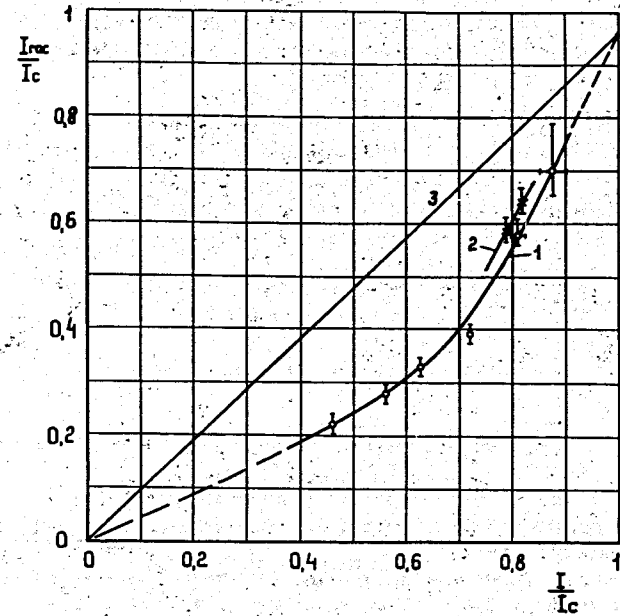


Рис. 10. Зависимость величины максимального тока через гасительное сопротивление от транспортного тока. 1 - $R = 100 \text{ Ом}$; 2 - $R_H = 40 \text{ Ом}$; 3 - идеальный выключатель /мгновенный и полный переход в нормальное состояние/, $R_{\text{выкл}} / R_{\text{гас.}} = 25$.

6. ВЫВОДЫ

1. Разработан и опробован на модели способ изготовления сверхпроводящих выключателей с тепловым управлением. Использован провод с ниобий-титановыми жилами диаметром 65 мкм. Матрица провода вытравливается, жилы сплетаются вместе с нагревательными проводами в косу, которая заливается эпоксидным компаундом. Найден состав компаунда, удовлетворяющий сложным условиям работы в выключателе.

2. Получены следующие основные параметры выключателя: критический ток 920 А; сопротивление в нормальном состоянии 2,5 Ом; минимальное время запаздывания 0,2 мсек.

3. Расчеты и результаты экспериментов с моделью показывают, что с помощью разработанной технологии возможно создание выключателя, позволяющего вести эвакуацию энергии из магнитов при токе в несколько килоампер и напряжении в несколько киловольт. При этом может быть достигнуто время переключения, меньшее 0,5 мсек.

Литература

1. Krebs. "Superconducting devices for energy storage and switching". Proc. of the ICEC IV, Eindhoven, pp. 172-176, 1972.
2. Amenda et al. "Untersuchungen für einen induktiven Power-Crowbar-Energiespeicher" Jahresbericht des Max-Planck-Institutes für Plasma-physik, München, 1972.
3. Laquer et al. "Superconducting magnetic energy storage and transfer" Proc. of the Appl. Super. Conf., Anapolis, pp. 98-101, 1972.
4. Brechna. "Materials and conductor configurations in superconducting magnets". Proc. of the 1968 summer study on super. devices and accelerators, Brookhaven, pp. 468-488, 1968.
5. Б.Я. Сухаревский и др. Особенности температурной зависимости теплоемкости ниобий-титанового сплава при переходе в сверхпроводящее состояние. ЖЭТФ, 54, 6, с. 1675-1679 /1968/.
6. Brewer et al. "A simple He-3 cryostat and He specific heat of nylon and epoxy resin below 4,2 K" Cryogenics, 6, No 1, pp. 49-51 (1968).
7. А.Г. Зельдович, Ю.А. Шишов. Сообщение ОИЯИ, 8-7018, Дубна, 1973.
8. Ю.А. Шишов, Х. Менке. Сообщение ОИЯИ, 8-7019, Дубна, 1973.
9. Wipf, Soell. "Flux-flow properties of bare Nb-Ti wire". Proc. of the ICEC IV, pp. 159-164, Eindhoven 1972.
10. Gauster "Steady-state performance of multistrand superconducting composite conductors". Journ. of Appl. Physics. Vol. 40, No 5, pp 2060 - 2065 (1969).

Рукопись поступила в издательский отдел
17 мая 1974 года.