

С3932

B-191

1453 / 2-77



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА

18/10 77

8 - 10323

В.А.Васильев, В.Я.Волков, Б.З.Житников,
А.Г.Зельдович, В.В.Крылов, Д.В.Приходько,
Ж.В.Трейбалова, Ю.А.Шишов

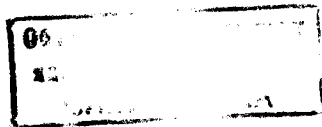
УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ
КРИТИЧЕСКОГО ТОКА
ОТ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
КОРОТКИХ ОБРАЗЦОВ СВЕРХПРОВОДНИКА

1977

8 - 10323

В.А.Васильев, В.Я.Волков, Б.З.Житников,
А.Г.Зельдович, В.В.Крылов, Д.В.Приходько,
Ж.В.Трейбалова, Ю.А.Шишов

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ
КРИТИЧЕСКОГО ТОКА
ОТ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
КОРОТКИХ ОБРАЗЦОВ СВЕРХПРОВОДНИКА



Васильев В.А. и др.

8 - 10323

Устройства для измерения зависимости критического тока от внешнего магнитного поля коротких образцов сверхпроводника

Описаны устройства для измерения зависимости критического тока I_c от внешнего магнитного поля H коротких образцов сверхпроводника ($I_{\text{макс.}} = 6,5$ кА, $H_{\text{макс.}} = 80$ кЭ).

Приведены вольт-амперные характеристики и зависимости $I_c(H)$ для провода из сплава ниобий - 50% титана (НТ-50) диаметром 0,7 мм и многожильной шины сечением $5 \times 2,5$ мм².

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

© 1977 Объединенный институт ядерных исследований Дубна

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных работ при создании сверхпроводящих магнитных систем является измерение токовых свойств сверхпроводящих обмоточных материалов.

В криогенном отделе ЛВЭ ОИЯИ создан стенд для массового измерения зависимости критического тока I_c от внешнего магнитного поля H у коротких образцов сверхпроводника. Подобные стенды и устройства имеются в ряде институтов, занимающихся разработкой сверхпроводящих магнитов /1,2/.

За время существования стенда испытаны сотни образцов, в том числе проволок из сплава ниобий - 50% циркония /НЦ-50/, проводов диаметром 0,5; 0,7; 0,85 мм с жилами из сплава ниобий - 50% титана /НТ-50/; металлургических многожильных шин сечениями $2,5 \times 2,5$ мм² и $5 \times 2,5$ мм²; ленты на основе станида ниобия и многих других.

Схема установки, обеспечивающей измерения в большом диапазоне токов /до 6,5 кА/ при напряженности поля до 80 кЭ, показана на рис. 1. Сюда входит следующее оборудование. Криостат с гелиевой частью 1, которая имеет внутренний диаметр 30 см и размещается в баке 2 с жидким азотом. Через скользящее уплотнение в криостат вставляется шток 3 с одним или несколькими короткими образцами 4. Электропитание образцов и соленоида 5 осуществляется двумя селеновыми выпрямителями 6, а при испытании сильноточных образцов используется генератор типа АНГ^{/3/}. Записи измерений ведутся на двухкоординатных самопишущих потенциометрах 7, разность потенциалов к которым от шунта может

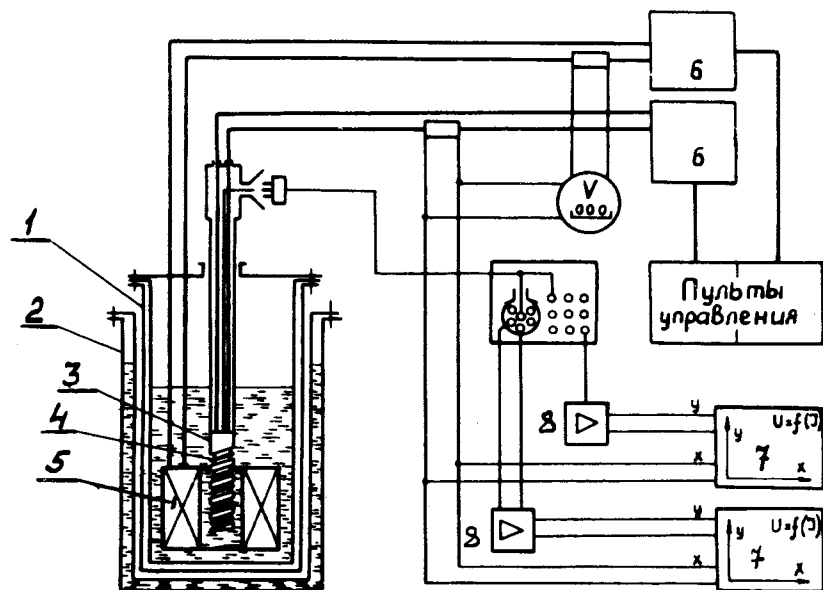


Рис. 1. Схема установки для измерения зависимости $I_c(H)$ коротких образцов сверхпроводника: 1 - криостат с внутренним ϕ 30 см, 2 - бак с жидким азотом, 3 - многопозиционный шток для образцов, 4 - образец, 5 - магнит, 6 - селеновый выпрямитель, 7 - потенциометры, 8 - усилители.

быть подана через усилитель 8. Чувствительность измерений составляет 200 и 20 мкВ на сантиметр шкалы. Удельное электросопротивление сверхпроводника в момент регистрации перехода составляет, в зависимости от требуемой точности измерения, $10^{-10} \div 10^{-12} \text{ Ом.см.}$

Источником магнитного поля служит сверхпроводящий соленоид с максимальной индукцией $\sim 8 \text{ Т}$, апертурой 40 мм и однородностью $\sim 1\%$ на длине оси $\pm 100 \text{ мм}$ ^{7/4/}.

Широкое распространение получила методика измерения $I_c(H)$ с помощью сменных штоков, на каждом из которых размещаются образец и шунт, предотвращающий перегорание образца в момент перехода в нормальное

состояние /см. рис. 8.4.1^{5/}/. Операция смены штока и измерения занимает много времени.

Известны также устройства, в которых к концам токовводов крепится несколько образцов ^{16/}. Образцы и шунты подключены через общий токоввод к одному из полюсов источника электропитания, а противоположные концы их отдельными токовводами через переключатель подсоединены ко второму полюсу. Ток подается к образцам поочередно путем перестановки рукоятки переключателя. Эти устройства позволяют уменьшить затраты времени на операцию смены образцов в криостате. Однако большое количество токовводов в жидкий гелий приводит к усложнению конструкции штока, увеличению его размера, веса и теплопритока в жидкий гелий. Кроме того, измерения по-прежнему требуют много времени, так как образцы испытываются поочередно.

В следующем разделе рассмотрены конструкция и работа устройства, лишённого перечисленных недостатков, которое отличается тем, что образец в нем крепится к низкоомному шунту /рис. 2/.

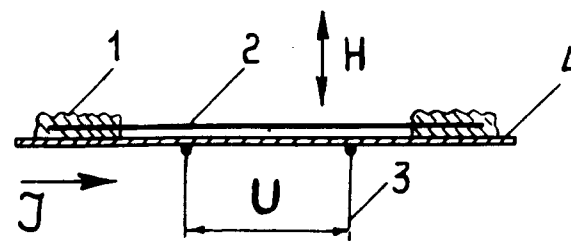


Рис. 2. Схема крепления короткого образца сверхпроводника на низкоомном шунте: 1 - индий, 2 - образец, 3 - потенциальные провода, 4 - шунт.

2. МНОГОПОЗИЦИОННЫЙ ШТОК

В криогенном отделе ЛВЭ ОИЯИ и, независимо, в ИАЭ им. И.В.Курчатова предложена конструкция винтового низкоомного шунта, на котором можно разме-

сстить несколько коротких образцов /см. рис. 3/. Конструкция шунта и его функции в предложенном устройстве существенно отличаются от таковых при традиционном защитном шунте. Во-первых, шунт полностью стабилизирован. Во-вторых, он имеет длину, достаточную для крепления большого количества образцов и потенциальных проводов /по два на каждый образец/. В-третьих, шунт изогнут так, чтобы можно было разместить максимальное количество образцов в данном объеме магнитного поля. И, наконец, шунт по-прежнему выполняет защитную роль, предотвращая перегорание образцов при их переходе в нормальное состояние, но время прохождения тока по нему ограничено не так строго.

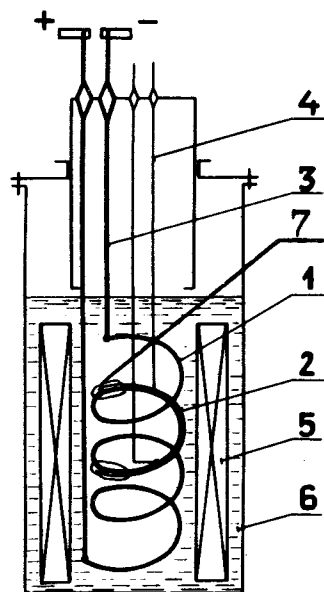


Рис. 3. Схема штока с винтовым шунтом: 1 - шунт, 2 - короткий образец сверхпроводника, 3 - токовводы, 4 - потенциальные провода, 5 - соленоид, 6 - криостат с жидким гелием, 7 - пайка индием.

Последовательное соединение образцов позволяет подводить ток по двум охлаждаемым вводам, теплоприток по которым в криостат невелик. Мощность кратковременных тепловыделений в шунте /без образцов/ при токе 0,5 кА составляет 33 Вт. Такая конструкция штока позволяет вводить одновременно ток во все образцы и

осуществлять запись вольт-амперных характеристик всех образцов за один цикл ввода-вывода тока. Это способствует значительному сокращению времени измерений. За время цикла образцы находятся в нормальном состоянии не более десяти секунд, поэтому испарение гелия шунтом незначительно.

На рис. 4 показан укрепленный на штоке шунт 1, изготовленный из медной шины с удельным электросопротивлением $\rho = 2,7 \cdot 10^{-8}$ Ом.см при $H = 0$ и $4,2 \cdot 10^{-8}$ Ом.см при $H = 5,7 \cdot 10^6$ А/м /70 кЭ/, площадью сечения $S = 5 \times 1,2$ мм² и номинальным током $I = 0,5$ кА. Шина навита на каркас 2 из текстолита и содержит 24 витка. Концы шины припаяны к токовым вводам 3 /медные трубки $\phi 10 \times 1$ мм/, по которым пропускается испаряющийся в криостате гелий. Токовводы уплотнены в головке 4 штока с помощью сальников 5, обеспечивающих также электрическую изоляцию токоведущих частей между собой и от корпуса 6 штока /труба $\phi 42 \times 0,3$ мм, сталь X18H10T/. На крышке криостата расположено скользящее уплотнение 7, в котором резиновые кольца обжимают тонкостенную фторопластовую втулку вокруг корпуса 6. К шлангам 8 присоединяют трубки, отводящие гелий в обратный поток, а на токовводы надевают зажимы 9, соединяющие их с источником электропитания. Потенциальные провода припаяны к шунту таким образом, чтобы на каждый образец приходилось два провода, расположенных на расстоянии 40 мм друг от друга. Провода уложены в паз каркаса 2, пропущены вдоль токовводов и припаяны к герметичному разъему 10.

В настоящее время изготовлен несколько улучшенный вариант штока. За счет изменения конструкции крепления винтового шунта увеличена поверхность его соприкосновения с гелием. Это позволяет повысить номинальный ток шунта. Легко сминаемая труба $\phi 42 \times 0,3$ мм заменена трубой $\phi 42 \times 2$ мм, упрощена конструкция головки штока и др.

Как уже говорилось, на описанной установке проведено большое количество испытаний по исследованию сверхпроводящего материала самого различного диаметра и сечения.

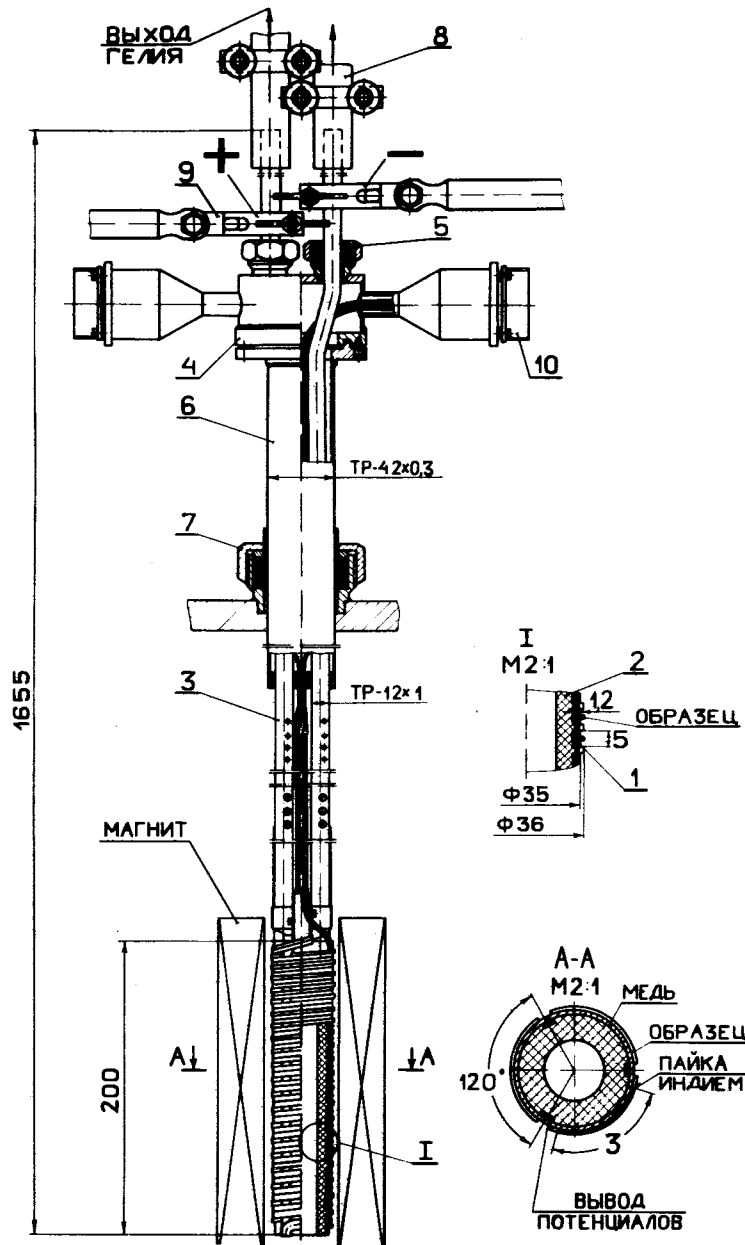


Рис. 4. Многопозиционный штوك.

В качестве примера, выбран сверхпроводящий провод из сплава ниобий - 50% титана /НТ-50/ диаметром 0,7 мм. Вольт-амперная характеристика этого провода представлена на рис. 5, а его зависимость $I_c(H)$ - на рис. 6.

Появление сопротивления регистрировалось при падении напряжения $7 \div 8 \cdot 10^{-7} \text{ В/см}$ длины образца, что соответствует удельному электросопротивлению $\rho \approx 10^{-11} \text{ Ом.см.}$

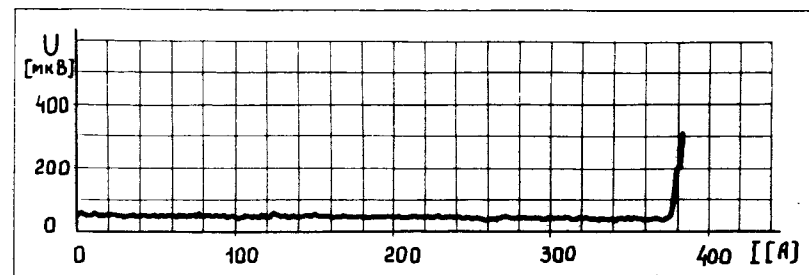


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика короткого образца сверхпроводящего провода НТ-50 $\varnothing 0,7$ мм.

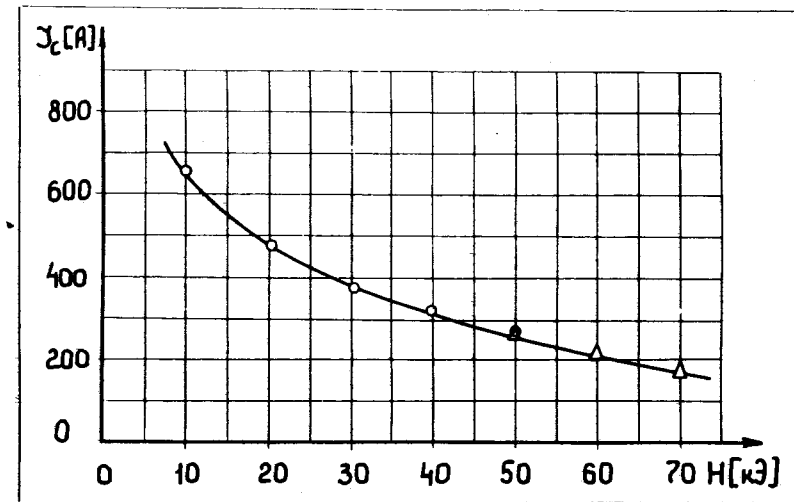


Рис. 6. Зависимость $I_c(H)$ короткого образца сверхпроводящего провода НТ-50 $\varnothing 0,7$ мм.

3. СИЛЬНОТОЧНЫЙ ШТОК

Измерения зависимости $I_c(H)$ шин и проводов большого сечения проводятся на описанном стенде с помощью разработанного в ЛВЭ ОИЯИ сильноточного штока. Аналогичные устройства имеются во всех лабораториях, занимающихся созданием крупных сверхпроводящих магнитов /см., напр., /7/ /.

Некоторые отличия в конструкции штока обусловлены тем, что испытания должны были проводиться на том же соленоиде с небольшой апертурой /40 мм/, который используется при работе с многопозиционным штоком. Оказалось желательным и сохранение размера уплотнения в криостате. Вместе с тем требовалось испытывать шины с I_c до 5÷6 кА.

Устройство штока показано на рис. 7. Токовводы 1 состоят из медных проводов /марки ПЩ6, диаметром проволок ~ 0,13 мм; $\rho_{4.2K} = 1,2 \cdot 10^{-8}$ Ом.см при $H=0$ /. Плюсовая и минусовая части вводов разделены стеклотекстолитовой пластинкой 2 и обмотаны снаружи фторопластовой лентой 3. Вводы помещены в трубу 4 из нержавеющей стали. Вместе с трубой 5 /диаметром 42x0,3 мм/ она замыкает полость, откачанную форвакуумным насосом и закрытую вентилем 6. Полость позволяет избежать замерзания скользящего уплотнения 17. Верхняя часть проводов припаяна к медным фланцам 7, которые одновременно служат местом подсоединения подводящих ток шин и крышками головки 8 штока. Уплотнение фланцев 7 с головкой 8 осуществляется с помощью фторопластовых прокладок 9 и стяжных шпилек 10, электрически изолированных от фланцев втулками 11 из текстолита. Прокладки 9 также обеспечивают электрическую изоляцию фланцев и головки. Токовводы охлаждаются гелием, который отводится в обратный поток по шлангу.

В нижней "холодной" части провода припаяны к низкоомному шунту 12, представляющему собой медную пластину с длинной продольной прорезью. Конфигурация и размеры шунта подобраны таким образом, чтобы на

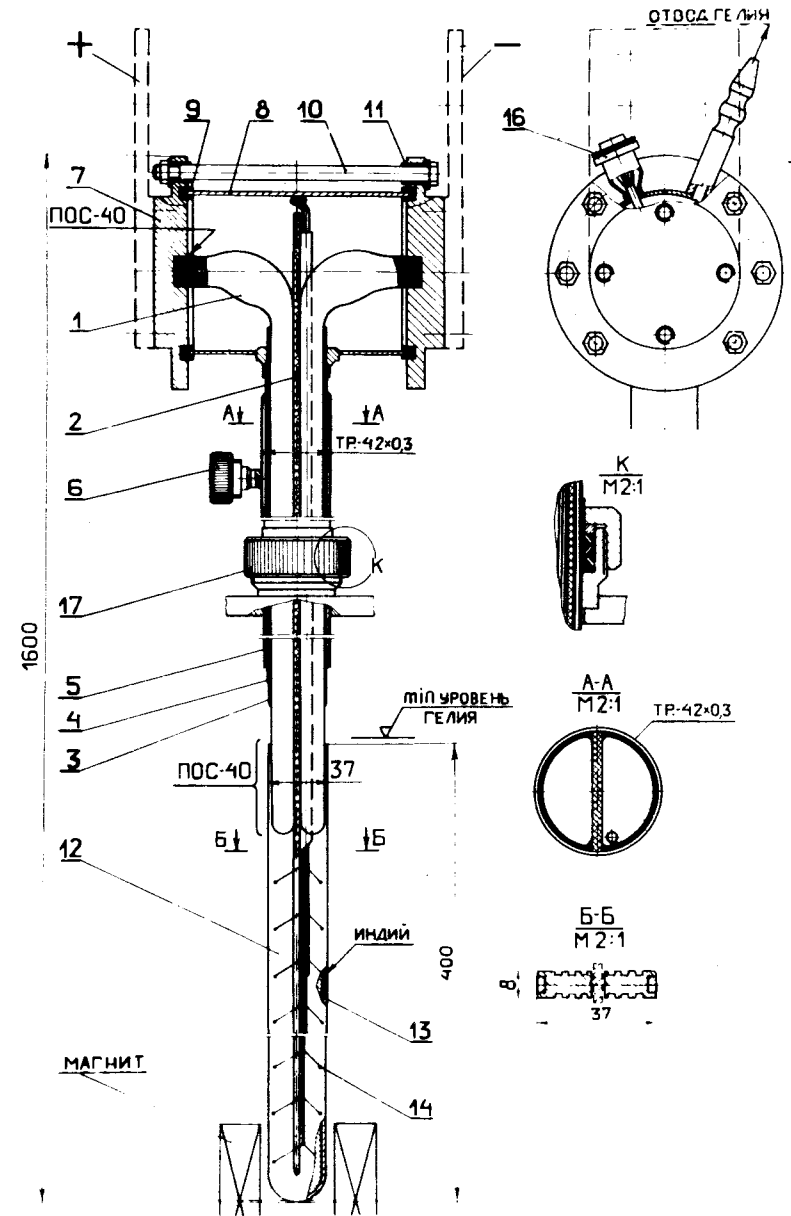


Рис. 7. Сильноточный шток.

нем можно было расположить достаточно длинный образец 13 сверхпроводника. Сопротивление шунта можно изменять за счет величины переключки в нижней его части. Величина сопротивления порядка 10^{-6} Ом достаточна, чтобы в момент измерения I_c при удельном электросопротивлении сверхпроводника, даже равном 10^{-11} Ом.см , доля текущего по шунту измерительного тока была невелика. Например, при испытании шины $5 \times 2,5 \text{ мм}^2$ эта доля составляет около 1%. Шунт имеет большую поверхность $\sim 400 \text{ см}^2$, что обеспечивает условия пузырькового кипения при максимальных токах и, следовательно, малый нагрев образцов.

Равномерно по длине шунта припаяны концы потенциальных проводов 14, с помощью которых можно не только измерить I_c , но и поверхностное сопротивление входа тока в образец. Провода через трубку 15 выводятся на герметичный разъем 16, расположенный в головке штока. Уплотнение 17 штока описано в разделе 2.

Длина токоведущей части равна 110 см, сечение одного ввода - $0,6 \text{ см}^2$. Испытания показали, что токовводы в автономном режиме охлаждения стабильны до 1,65 кА. Выше этого тока шток можно использовать в режиме нестационарного нагрева токовводов. Например, время нагрева верхней части ввода до допускаемой температуры $\sim 370 \text{ К}$ током 6,5 кА составляет 30 с. Этого промежутка достаточно, чтобы правильно измерить I_c многих образцов.

Выбранные размеры токоввода позволили сделать шток легким, компактным, и обеспечивают в то же время сравнительно небольшие затраты жидкого гелия за цикл испытания образца, так как максимальные токи достигаются за короткий промежуток времени.

Опыт эксплуатации с описанным штоком позволил создать более надежную конструкцию. Трубка $\phi 42 \times 0,3 \text{ мм}$ заменена более прочной трубкой $\phi 42 \times 2 \text{ мм}$, внутрь которой вставлена текстолитовая труба $\phi 38 \times 3 \text{ мм}$. Отказ от вакуумной полости в штоке позволил увеличить сечение токоведущих частей до 1 см^2 /на полюс/ и улучшить их электрическую изоляцию.

4. МНОГОЖИЛЬНАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ШИНА СЕЧЕНИЕМ $5 \times 2,5 \text{ мм}^2$

Среди шин, испытанных на стенде, наиболее высоким требованиям отвечает многожильная шина сечением $5 \times 2,5 \text{ мм}^2$, предназначенная для соленоида с внутренним диаметром 0,6 м /см. таблицу/. Соленоид используется для создания магнитного поля напряженностью $\sim 1,6 \cdot 10^6 \text{ А/м}$ /20 кЭ/ и однородностью 0,1% в ионопроводе установки "Кольцетрон" /8/.

Таблица

Основные параметры металлургической шины

Сечение шины /мм ² /	5x2,5
Материал сверхпроводника	ниобий-титан
Материал матрицы	медь
Диаметр жилы /мкм/	60
Количество жил	1500
Шаг свивки жил /мм/	35
Максимальная длина куска шины без соединений /м/	1600
Отношение удельных сопротивлений меди $\rho_{300\text{К}} / \rho_{10\text{К}}$	135
Соотношение сечений меди и сверхпроводника	2:1
Изоляция шины	два слоя стеклотекстолита в эпоксиде, 0,15 мм
Максимальная плотность тока в сверхпроводнике при 20 кЭ /А/см ² /	$1,5 \times 10^5$

Одна из вольт-амперных характеристик этой шины показана на рис. 8. Появление сопротивления регистрировалось при падении напряжения $/5 \div 6 / \cdot 10^{-7} \text{ В/см}$ длины образца, что соответствует удельному сопротивлению сверхпроводника в шине $\rho \approx 10^{-11} \text{ Ом.см}$. Измеренный при этом ток I_c считается критическим.

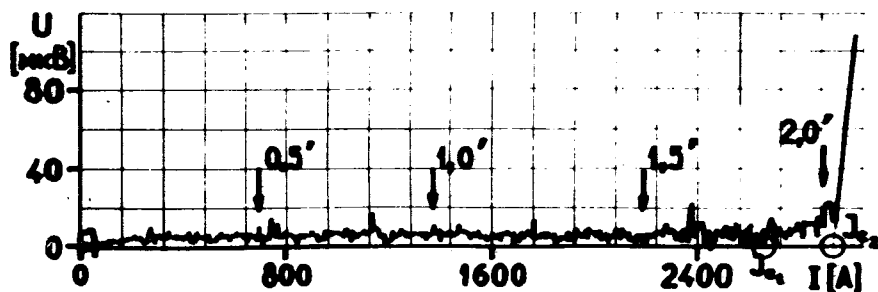


Рис. 8. Вольт-амперная характеристика короткого образца шины сечением $5 \times 2,5 \text{ мм}^2$. Критический ток I_{c1} , соответствующий удельному сопротивлению образца $\rho \sim 4 \cdot 10^{-13} \text{ Ом.м}$. I_{c1} - критический ток при $H = 40 \text{ кЭ}$. I_{c2} - критический ток при скачкообразном росте напряжения.

Более точные измерения затруднены неровностью вольт-амперной характеристики.

Снижения I_c в зависимости от скорости введения тока в образец не наблюдается вплоть до допустимой аппаратурой скорости 220 А/с .

Зависимости $I_c(H)$ образцов и I_{c1} , H_{c1} пробных соленоидов, имеющих внутренний диаметр 100 мм , представлены на рис. 9.

5. ВЫВОДЫ

1. Создан стенд для измерения зависимости $I_c(H)$ коротких образцов сверхпроводящих обмоточных материалов /максимальные $I = 6,5 \text{ кА}$, $H = 6,4 \cdot 10^6 \text{ А/м}$ / $\approx 80 \text{ кЭ/}$.

2. Предложено /независимо в ОИЯИ и ИАЭ им. И.В.Курчатова/ и разработано устройство /шток с винтовым низкоомным шунтом/, обеспечивающее быстрое и массовое измерение зависимости $I_c(H)$ образцов при $I \leq 0,5 \text{ кА}$. Подробные сведения о выборе параметров винтового шунта и анализ методики измерения приведены в работе /9/.

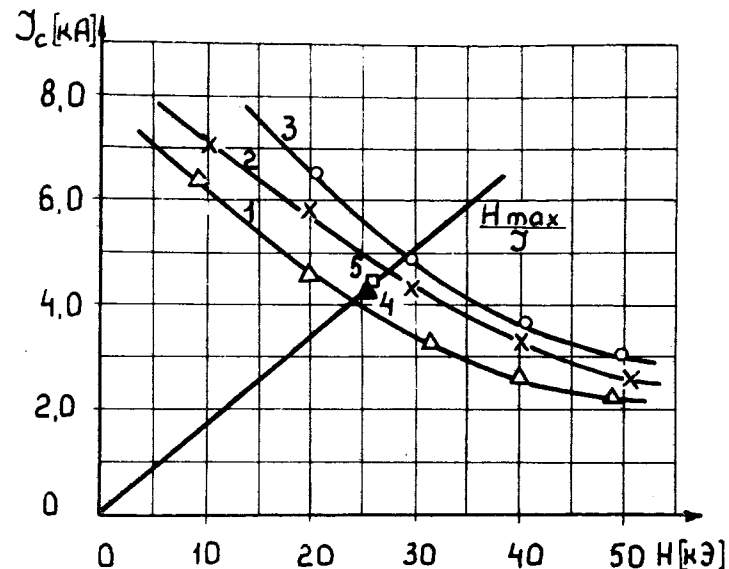


Рис. 9. Зависимость $I_c(H)$ коротких образцов шины сечением $5 \times 2,5 \text{ мм}^2$ и $H_{\text{макс}}/I$ контрольных соленоидов: 1,2 - образцы от концов шины длиной $1,5 \text{ км}$, 3 - образец от шины, подвергнутой дополнительной термообработке, 4,5 - пробные соленоиды из шины с образцами 1,2.

3. Испытано большое количество коротких образцов разнообразных обмоточных материалов, что позволило изготовить ряд лабораторных магнитов, в том числе соленоиды с внутренними диаметрами $0,35$ и $0,04 \text{ м}$.

4. Исследована изготовленная по техническим условиям ОИЯИ сильноточная внутренне-стабилизированная шина с размерами сечения $5 \times 2,5 \text{ мм}^2$. Правильность выбранной конструкции и методики испытаний подтверждена успешной работой соленоида с внутренним диаметром $0,6 \text{ м}$ и длиной $2,4 \text{ м}$, входящего в установку "Кольцетрон".

ЛИТЕРАТУРА

1. Курочкин В.И. 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. М., "Наука", 1969, с.145-151.
2. Кейлин В.Е., Клименко Е.Ю., Самойлов Б.Н. ПТЭ, 1971, №1, с.216.
3. Анищенко Н.Г., Приходько Д.В. ОИЯИ, Б2-13-4689, Дубна, 1969.
4. Кабат Д. ОИЯИ, Р8-10003, Дубна, 1976.
5. Уильямс Дж. Сверхпроводимость и ее применение в технике. Изд. "Мир", 1973.
6. Литвинов В.Н., Тапищев Ю.Ф. Измерение характеристик и распределение в обмотке электромагнита СПЭ-600 NbZr сверхпроводящих шин". Труды ИАН СССР, 1973. №15.
7. Wittgenstein F., Feldman M., Nerve A. Cryogenics, 1969, vol. 9, No. 3, pp.158-164.
8. Анищенко Н.Г. и др. ОИЯИ, Р9-5488, Дубна, 1970.
9. Трейбалова Ж.В., Шишов Ю.А. ОИЯИ, Б2-8-10322, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 января 1977 года.