

Г- 657

11/II - 69

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

Р8 - 4194



И.Н.Гончаров, Ф.Хованец

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННАЯ  
СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА  
С ОПТИМИЗИРОВАННЫМ ПИТАНИЕМ

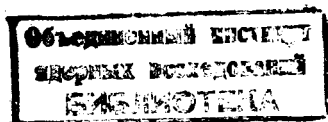
1968

Р8 - 4194

И.Н.Гончаров, Ф.Хованец

ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННАЯ  
СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА  
С ОПТИМИЗИРОВАННЫМ ПИТАНИЕМ

Направлено в ПТЭ



4651/2 нр.

## В в е д е н и е

Полностью стабилизированные магнитные системы /1/, в которых сверхпроводник зашунтирован нормальным металлом достаточно большого сечения, обладают двумя важными преимуществами. Во-первых, переход в нормальное состояние происходит в них контролируемым образом, что предотвращает разрушение соленоида, и во-вторых, в них отсутствует эффект деградации критического тока, вследствие чего можно по известным характеристикам данного сверхпроводящего материала точно предсказать  $I_c$  соленоида.

Однако большое количество меди, необходимой для полной стабилизации, ведет к существенному увеличению габаритов соленоида, веса сверхпроводника и всей обмотки в целом, что неизбежно приводит к возрастанию расхода жидкого гелия. Кроме того, средняя критическая плотность тока оказывается низкой, что является нежелательным, особенно в тех случаях, где требуются высокие эффективные плотности тока, например, в магнитных линзах. Поэтому представлялось интересным исследовать поведение частично стабилизированных /2/ магнитных систем достаточно больших размеров, которые в значительной степени лишены отмеченных недостатков. Ниже приводится описание и результаты испытаний одной из таких систем, разработанных и исследованных нами в ОИЯИ.

## Конструкция магнита

Магнит, состоящий из шести секций, схематично изображен на рис.1. Основные данные для всех секций приведены в табл. 1. Секции С, D,

В и А намотаны на отдельных каркасах и имеют отдельные тоководы, что позволяет легко изменять внутренний рабочий диаметр соленоида. Секция А используется вместе с ферромагнитными концентраторами /3/ из пермендюра для измерений в полях до 120 кгс. Наружные секции Г и Д намотаны семижильным комбинированным кабелем (наружный диаметр 1 мм) с разным отношением медных и сверхпроводящих жил (см. табл. 1). Контакты сверхпроводник-сверхпроводник, соединяющие отдельные части кабеля между собой и сверхпроводящий ключ с обмоткой, изготовлены в виде массивных зажимных блоков размером  $60 \times 20 \times 10 \text{ мм}^3$  из меди, облуженной оловянно-свинцовым припоем. Сверхпроводящие жилы скручены между собой и зажаты в блоки. Тоководы для секций Г и Д выполнены в виде медных трубок, охлаждаемых парами гелия. К нижней части трубок припаяна стабилизированная сверхпроводящая лента (4) (рис. 1), проходящая с наружной стороны обмотки к медным блокам, которые вместе со сверхпроводящим ключом расположены с нижней стороны магнита. Все секции снабжены перегреваемыми сверхпроводящими ключами, которые позволяют работать с отключенным источником тока (в режиме "замороженного" поля) даже тогда, когда уровень гелия опускается до нижнего края соленоида. Расположение контактов внизу также важно и с точки зрения сохранности соленоида, как будет показано ниже.

#### Электрическая схема с оптимизированным питанием

Ввиду того, что  $I_c(H)$  сверхпроводящих материалов сильно зависит от магнитного поля, которое внутри обмотки соленоида меняется от максимального значения до нуля, к оптимальному распределению тока можно приблизиться либо разбиением обмотки (при одинаковом сечении сверхпроводника по длине) на отдельные секции для питания их разными токами, либо уменьшением сечения сверхпроводника по мере перехода от внутренних к наружным слоям. В описываемом соленоиде использованы оба указанных способа. Изменение сечения сверхпроводника осуществлялось применением для отдельных секций соленоида кабеля с раз-

ным отношением сверхпроводящих и медных жил (табл.1). Для запитки много-секционного соленоида использовалась оптимизированная схема с дополнительными источниками (рис.2): к току основного источника, проходящего через весь соленоид, прибавляются в разных секциях токи от дополнительных, менее мощных источников. Таким образом, удается снизить общую стоимость источников питания и уменьшить расход жидкого гелия, испаряемого за счет токовыводов, так как дополнительные тоководы рассчитаны на сравнительно малые токи (25+40а) при основном токе порядка 150 а. Вследствие того, что в данном случае источники тока содержат элементы, пропускающие ток преимущественно в одном направлении (селеновый выпрямитель и транзисторные регуляторы), то не было необходимости последовательно с каждой секцией включать диоды, которые предотвращали бы протекание тока не в заданном направлении.

На блок-схеме, приведенной на рис. 2, показаны: пульт управления (5) источниками тока (1,2,3) и сверхпроводящим ключом (8), который охватывает всю секцию G соленоида (9) и имеет  $R_n \approx 0,2$  ом; омический шунт (7) с сопротивлением порядка 0,5 ом, параллельно которому включены управляемые вентили; схема индикации перехода соленоида в нормальное состояние и релейная защита (4), отключающая источники. Последняя срабатывает при внезапном появлении большого потенциала (порядка 10 вольт), свидетельствующего о лавинообразном нарастании сопротивления внутри соленоида. При этом до отключения основной источник оказывается закороченным открывающимися управляемыми вентилями, которые включены в прямом направлении. Часть энергии, запасенной в соленоиде, выделяется в виде тепла в наружном шунте (7). Для раннего обнаружения перехода части обмотки соленоида в нормальное состояние используется мостиковая схема, плечами которой являются два произвольных участка соленоида и наружный омический делитель, балансирующий реактивные сопротивления участков. Чувствительный прибор, включенный в диагональ мостика, реагирует на появление очень малых (по сравнению с э.д.с. самоиндукции) напряжений, свидетельствуя о появлении малого активного сопротивления в одном из участков соленоида (который легко определить по знаку сигнала).

Результаты испытаний при температурах 4,2 и 1,8°K представлены в табл. 2 и на рис. 3. Максимальные поля были получены при пониженной температуре и составляли 95 кгс в центре внутренней секции А диаметром 8 мм и 122 кгс в зазоре 0,8 мм между пермендюрowymi концентраторами. В секции G, которая представляет интерес с точки зрения возможности применения частично стабилизированных сверхпроводников для создания высоких полей в сравнительно больших объемах, получено максимальное поле порядка 80 кгс в объеме  $\approx 500 \text{ см}^3$ .

Чтобы оценить преимущества и недостатки частично стабилизированных систем с размерами, характерными для секции G, мы провели сравнение с полностью стабилизированным соленоидом CERL (Великобритания)<sup>/4/</sup>. Как видно из табл. 3, даже при несколько меньшем рабочем диаметре и максимальном поле в случае соленоида CERL вес сверхпроводника почти в 4 раза, а всей системы в 12 раз больше, чем в случае частично стабилизированной секции. Это явилось следствием того, что коэффициент заполнения в секции G был выше, чем в соленоиде CERL, в результате чего эффективная плотность тока ( $J_c \text{ эфф.}$ ) в ней оказалась почти в три раза больше (несмотря на некоторую деградацию), а ее наружный диаметр гораздо меньше, чем в полностью стабилизированном соленоиде.

Возникает общий вопрос, в каких случаях выгоднее применять частично стабилизированный сверхпроводник по сравнению с полностью стабилизированным? С точки зрения расхода сверхпроводника и жидкого гелия первый оказывается выгоднее до тех пор, пока из-за деградации критического тока  $J_c \text{ эфф.}$  не окажется столь низкой, что вес сверхпроводника в обоих случаях станет одинаковым. Ввиду того, что до сих пор отсутствует теория, которая связывала бы коэффициент деградации для данного сверхпроводящего материала с размерами системы, эту связь приходится находить эмпирически. На рис. 3 приведены результаты испытаний при 4,2°K ряда соленоидов различных размеров (см. табл. 4), изготовленных так же, как и секция G, из кабеля 65BT6 + 1Cu. Там же приведена предельная кривая для полностью стабилизированной обмотки из этого же кабеля:

$$I_{\text{пред}} = \sqrt{\frac{P_{\text{пред}} A}{R_n(H)}}, \quad (1)$$

где  $A$  — боковая поверхность 1 см кабеля,  $R_n(H)$  — остаточное сопротивление кабеля в данном поле на единицу длины, а  $P_{\text{пред}}$  — удельная мощность, при которой наступает пленочное кипение и скачком поднимается температура от  $\approx 0,5^\circ\text{K}$  до большой величины.  $R_n(H)$  было измерено нами после перегрева участка кабеля несколько выше критической температуры и равнялось  $9 \cdot 10^{-6}$  ом/см в нулевом поле, повышаясь до  $18 \cdot 10^{-6}$  ом/см в поле 60 кгс. Что касается  $P_{\text{пред}}$ , то в полностью стабилизированных системах эту величину принимают в пределах от  $0,15$  вт/см<sup>2</sup> до  $0,4$  вт/см<sup>2</sup> /4/. Как видно из рис. 3, частично стабилизированные соленоиды довольно крупных размеров устойчиво работают в области токов, значительно превышающих  $I_{\text{пред}}$ , рассчитанный для максимально высокой величины  $P_{\text{пред}} = 0,4$  вт/см<sup>2</sup> (в указанных соленоидах обмотка сделана очень плотной, и эта величина в действительности оказалась  $\approx 0,01$  вт/см<sup>2</sup>, как показали прямые измерения).

Другим обстоятельством, требующим рассмотрения при использовании частично стабилизированного сверхпроводника, является возможность повреждения обмотки при переходе ее в нормальное состояние. В описываемом соленоиде повреждение наблюдалось лишь в результате перегорания подводящего кабеля, когда уровень гелия был ниже блоков, находившихся первоначально над соленоидом. В этом случае переход в нормальное состояние части кабеля не приводил к лавинообразному переходу всего соленоида, а напряжение на перешедшем участке было слишком малым, чтобы зарегистрировать переход и отключить внешний источник (мостиковая схема тогда еще не применялась). После перегорания подвода вся запасенная энергия выделялась в одном месте в виде дуги. Чтобы избежать этого, мы перенесли блоки на нижнюю часть соленоида, а каждую секцию зашунтировали наружным шунтом с малым сопротивлением ( $\approx 0,15$  ом), на котором выделялось  $40 + 50\%$  энергии при переходе соленоида в нормальное состояние.

Из временных характеристик тока и напряжения на концах обмотки G (рис. 4) по методу, описанному в /6,7/, были определены максимальное перенапряжение внутри обмотки ( $\approx 300$  в) и максимально возможный локальный нагрев ( $\approx 400^\circ\text{C}$ ). Так как секция G выдержала более 15 переходов без ухудшения характеристик, эти величины либо не являются опасными, либо практически не достигаются в описываемом соленоиде.

В заключение можно сказать, что для создания магнитных полей  $50 + 60$  кгс в объемах несколько сотен см<sup>3</sup> можно с успехом применять частично стабилизированные системы, которые, обладая рядом преимуществ перед полностью стабилизированными, позволяют достигать высоких эффективных плотностей тока, не опасаясь повреждения соленоида.

Авторы признательны А.Г. Зельдовичу за внимание и поддержку; Б.Н. Самойлову, Е.Ю. Клименко, В.Н. Агурееву, В.Е. Кейлину, предложившим мостиковую схему; В.М. Дробину, А.П. Коростелеву, В.Ф. Чумакову за помощь в изготовлении и испытании соленоида, а также группу Н.И. Баландикова за бесперебойное снабжение жидким гелием.

#### Л и т е р а т у р а

1. Stekly Z.J.J., Zar J.L., Trans. IEEE, NS-12, 367 (1965).
2. Hancox R., Proc. II Int. Conf. on Magnet Technology, 477, Oxford, 1967.
3. Гончаров И. Н., ПТЭ, №2, 236 (1967).
4. Maddock E. J., Carter C.N., Barratt P.B., Proc II Int. Conf. on Magnet Technology, 533, Oxford, 1967.
5. Бычков Ю. Ф., Верещагин В. Г., Карасик В. Р., Курганов Г. Б., Мальцев В. А. Препринт ФИАН, №112, Москва, 1968.
6. Taylor C.E., Nelson R.L., Henning C.D., Taylor A.R., Harvey A. Proc. II Int. Conf. on Magnet Technology, 617, Oxford, 1967.
7. Desportes H., Proc II Int. Conf. on Magnet Technology, 603, Oxford, 1967.
8. Альтов В. А., Зенкевич В. Б., Карасик В. Р., Сычев В. В., Товма В. А. ПТЭ, №1, 203 (1968).

Рукопись поступила в издательский отдел

10 декабря 1968 года.



Таблица 1

Характеристика сверхпроводящей системы

секция	размеры мм				проводник			обмотка			примечание	
	Внутр. $\Phi$ рабочей	Внутр. $\Phi$ обмотки	наружн. $\Phi$ обмотки	Высота обмотки	сверхпр. ■ Cu □	сверхпроб. материал	отношение Cu/сверхпроб	число вытков	коэф. запальной	господиная солдериная плёнка		
G <sub>III</sub>		142	181	171	кабель 3сверх. 4Cu		656T	2,3/1	2466	0,109	0,126	после каждого слоя лабс. плёнка 0,015мм
G <sub>II</sub>		126	142	171	кабель 6 + 1Cu		656T	0,75/1	1188	0,255	0,078	после каждого 4-го слоя Си фольга 0,05мм
G <sub>I</sub>	85	88	126	171					2684	0,244	0,170	
G	85	88	181	171					6338	0,373	— " —	
D	41	42,6	81	126	кабель 7сверх.		656T		2158	0,302	0,2	
B	18	20	38.	64	провол.		HЦ75	1,3/1	2145	0,28	0,4	
A	8	9	17,5	48	провол.				728	0,29	0,15	

Таблица 2

Максимальные значения поля в магните при близком к оптимальному распределению токов от трех источников

Секция		G	G + D	G + D + B + A	
Внутренний $\Phi$		85 мм	40 мм	8 мм	с полюсами (зазор 0,8мм)
Максим. поле в центре, мкс	T=4,2°K	52	68	76	I03
	T=1,8°K	60	80	95	I22

Таблица 3

Сравнение характеристик полностью и частично стабилизированных сверхпроводящих магнитов

Полностью стабилизиров. магнит (CERL - Англия)		Частично стабилизирован. магнит (секц. G - ОИЯИ)	
Внутренний $\varnothing$ (рабочий), мм	82	85	
Наружный $\varnothing$ обмотки, мм	400	181	
Высота обмотки, мм	250	171	
$\varnothing$ крестата, мм	560	200	
Характеристика	Лента	Кабель	
Сверхпроводник	$Nb-Ti \varnothing 0,25\text{мм}$	(65BT) $\varnothing 0,25\text{ мм}$	
Число сверхпровод. жил	60	$G_I + G_{II}$	$G_{III}$
		6	3
Коэффициент заполнения (по сверх.)	0,073	0,25	0,109
		$8,7 \cdot 10^5$	
Ампервитки	$14,5 \cdot 10^5$		
Общий вес сверхпровод., кг	17	4,5	
Общий вес магнита, кг	180	14,5	
Максимальный ток, А	1650 (2050) <sup>x</sup>	138 (162) <sup>xx</sup>	
Максимальное полученное поле в центре, кГс	48(60) <sup>x</sup>	52 (60) <sup>xx</sup>	
Максимальный ток на сверх. жилу, А	27,5	23	
Средняя плотность тока (А/см <sup>2</sup> )	$3,9 \cdot 10^3$	$11 \cdot 10^3$	
Индуктивность, Гн	0,07	1,7	
Запасенная энергия, кДж	96 (150) <sup>x</sup>	16,5 (22,2) <sup>xx</sup>	

x) Работа в области неполной стабилизации

xx) Данные для  $T = 1,8^{\circ}\text{K}$

Таблица 4  
 Соленоиды из кабеля 65БТ 6 + 1 Си  
 (Испытания при T=4,2°K).

№ соленоидов на рис.3	Внутр. рабоч. Ø обм. мм	Внутр. Ø обм. мм	Наруж. Ø обм. мм	Высота, мм	Крит. ток, А	Поле в центре, кГс	Макс. поле в обм., кГс	Ссылка	Примечание
I	40	44	II4	I32	I80	43,5	50	Настоящая работа	
2	40	44	II8	2x32	I90	43 <sup>x)</sup>	54		x) Катод. Гольм-гольца (поле в центре каждой)
3		30	68	77	237	4I	42	/8/	
4		55	II3	I23	I45	48	55	- " -	
5	200	204	280	46,5	I77	I8	4I	- " -	
6		I26	I42	I7I	I92	I4,8	I5,8	Настоящая работа	
7	85	89	I8I	I7I	I37	52,5	54	- " -	Наружн. секц. GIII ØI42 мм из кабеля 3+4Си
8	85	89	I42	I7I	I54	50	52	- " -	В поле I4 кГс от нар. GIII.
9	85	89	I42	I7I	I45	36	37,5	- " -	
IO	I48	I48	I85	II5	I80	22	28	- " -	
II	I4	I8	I50	I7I	II0	65		/5/	

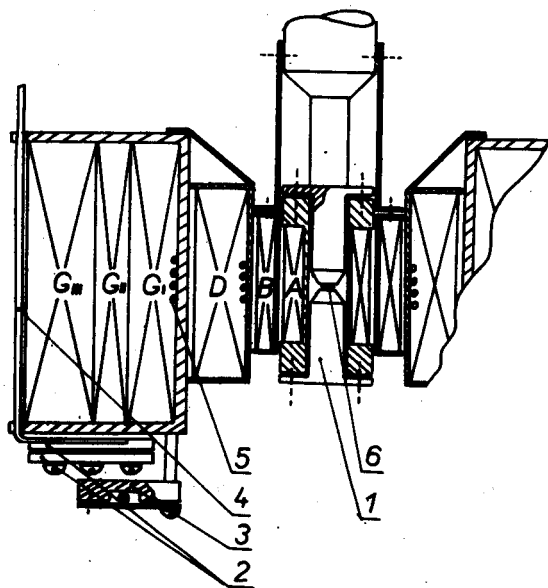


Рис.1. Схема магнита. 1 - полюсы, 2 - медные блоки. 3 - сверхпроводящий ключ. 4 - токовводы, 5 - магнетосопротивления. 6 - датчик Холла.

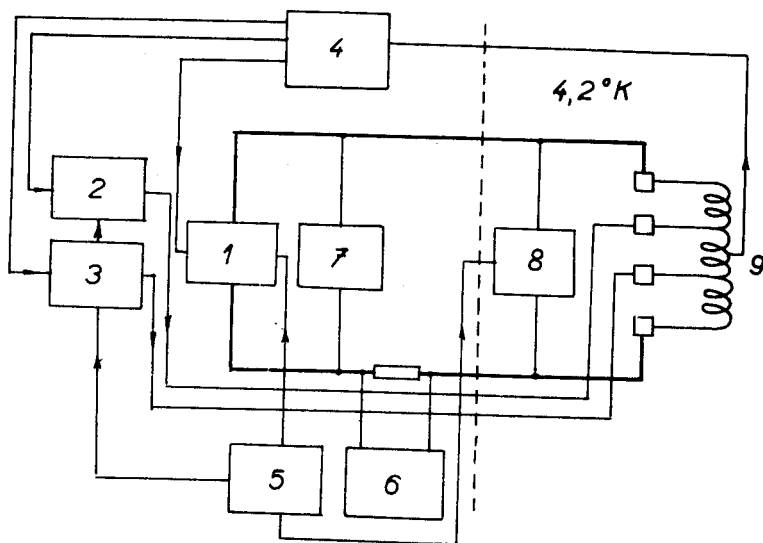


Рис.2. Электрическая схема. 1 - основной источник тока. 2,3 - дополнительные источники. 4 - схема защиты. 5 - управление источниками и сверхпроводящим ключом. 6 - контроль тока. 7 - вывод энергии, аварийная защита. 8 - сверхпроводящий ключ. 9 - сверхпроводящий соленоид.

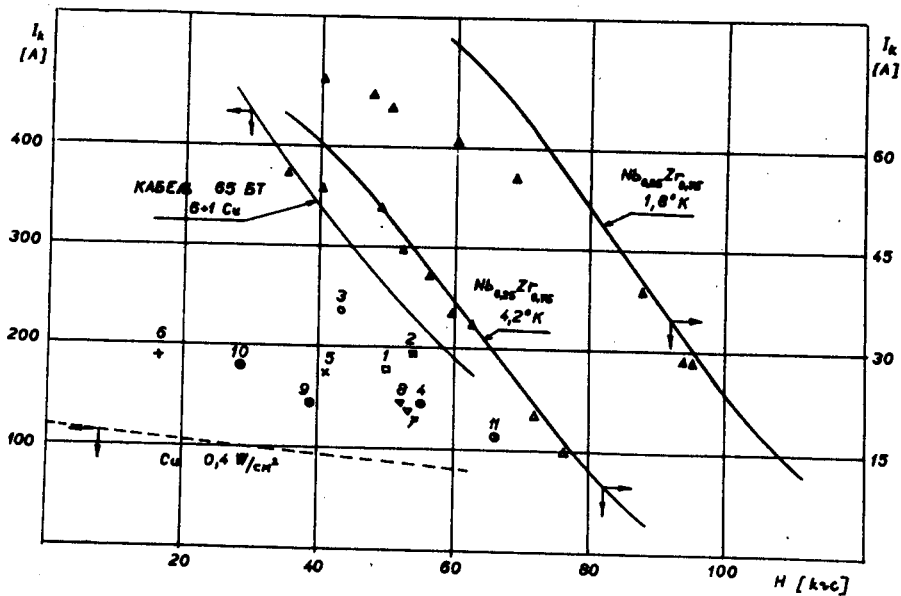


Рис.3. Характеристика сверхпроводников и результаты испытаний соленоидов. — характеристика короткого образца. - - - граница полной стабилизации для кабеля 65БТ 6 + 1Сu (без изоляции).  $\Delta$  - переход сѣкции из Nb - 75% Zr при 4,2°К.  $\blacktriangle$  - переход сѣкции из Nb - 75% Zr при 1,8°К. Точки с номерами - результаты испытаний соленоидов, изготовленных из кабеля 65БТ 6 + 1Сu . Характеристики соленоидов под соответствующими номерами приведены в табл. 4.

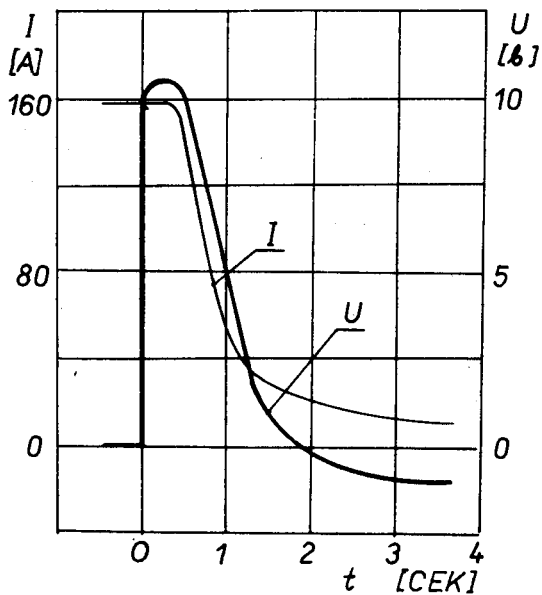


Рис.4. Временные характеристики перехода секции G в нормальное состояние.