

12
ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



4717/2-78

P8 - 11700

С.А.Аверичев, В.Г.Аксенов, А.М.Балдин,
Е.И.Дьячков, А.Г.Зельдович, Ю.В.Куликов,
Л.Г.Макаров, Е.А.Матюшевский, П.И.Никитаев,
Р.В.Полякова, А.А.Смирнов, Г.Г.Ходжибагян,
Ф.Хованец, И.А.Шелаев

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ИМПУЛЬСНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ
ТИПА "ОКОННАЯ РАМА"
ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОЛЕЙ ДО 2,5 Т

1978

С.А.Аверичев, В.Г.Аксенов, А.М.Балдин,
Е.И.Дьячков, А.Г.Зельдович, Ю.В.Куликов,
Л.Г.Макаров, Е.А.Матюшевский, П.И.Никитаев,
Р.В.Полякова, А.А.Смирнов, Г.Г.Ходжибагиан,
Ф.Хованец,* И.А.Шелаев

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ИМПУЛЬСНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ
ТИПА "ОКОННАЯ РАМА"
ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОЛЕЙ ДО 2,5 Т

*Направлено на УІ Всесоюзное совещание по ускорителям
заряженных частиц (Дубна, 1978 г.) и на УІІ Междуна-
родную конференцию по криогенной технике (Лондон,
1978 г.).*

* Электротехнический институт Словацкой академии наук, Братислава, ЧССР.

Аверичев С.А. и др.

P8 - 11700

Некоторые характеристики импульсных сверхпроводящих магнитов типа "оконная рама" для создания полей до 2,5 Т

Если поле сверхпроводящего дипольного магнита ограничить величиной около 2,5 Т, то существенно упрощается его конструкция и уменьшается объем сверхпроводящей обмотки и вес магнитопровода. Для оценки перспектив применения сверхпроводящих диполей типа "оконная рама" с полем 2,5 Т при сооружении сравнительно небольших синхротронов с частотой циклов ускорения 0,1-0,5 Гц в ЛВЭ было испытано несколько моделей таких магнитов длиной около 0,4 м, апертурой 5,5-7,6 см, с полем до 2,7 Т.

Приводятся результаты измерения критических токов, зависимость их от скорости роста магнитного поля, величины неоднородности магнитного поля и потерь энергии в магните при импульсном режиме работы. Наблюдаемая в полях выше 1,8 Т неоднородность магнитного поля компенсировалась дополнительной обмоткой.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Averichev S.A. et al.

P8 - 11700

Some Properties of 2.5 T "Window Frame" Type Superconducting Magnets

"Window frame" type superconducting dipole magnets with a maximum field of 2.5 T are simple in construction; their small weight and winding volume can be achieved in such systems. In order to evaluate the perspective of using 2.5 T "window frame" type dipole magnets in relatively small synchrotrons with a repeating frequency of 0.1-0.5 Hz, several models of magnets have been tested. The length of the magnets was about 0.4 m, their aperture, 5.5-7.6 cm and the magnetic field, up to 2.7 T. The experimental data on critical currents, magnetic field inhomogeneity, ramp rate test and ac losses are presented. A magnetic field inhomogeneity of above 1.8 T has been compensated using correction coils.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа выполнена в соответствии с развиваемой в ЛВЭ ОИЯИ программой нуклотрона - сверхпроводящего синхротрона релятивистских ядер^{1/}, и в ней приведены результаты исследования параметров пяти моделей импульсных сверхпроводящих магнитов типа "оконная рама".

Сверхпроводящие магниты этого типа изучались в работах^{2-4/}, где показана возможность получения в них полей 4Т и выше достаточно высокого качества. Если поле магнита ограничить величиной 2,5Т, то существенно упрощается конструкция магнита, уменьшается объем обмотки и вес магнитопровода, что значительно облегчает их изготовление в лабораторных условиях. Малый объем сверхпроводника и низкая величина запасенной в обмотке энергии позволяют надеяться на достижение высоких частот повторения циклов ускорения (0,1-0,5 Гц) и увеличение средней интенсивности пучка.

В ЛВЭ было начато моделирование таких магнитов для оценки перспектив применения сверхпроводящих диполей с полем 2,5 Т при сооружении относительно небольших синхротронов.

КОНСТРУКЦИЯ МАГНИТОВ

Отдельные магниты отличались размерами, конструкцией магнитопровода и параметрами сверхпроводящего кабеля (см. таблицу).

Основным силовым элементом сверхпроводящих комбинированных диполей (СКД) служит железное ярмо, находящееся при температуре жидкого гелия и воспринимающее возникающие в обмотке динамические усилия. Ярмо состоит из двух половин. Полуярма диполя СКД-74 изготовлены из сплошного бруска стали, у остальных диполей - из 0,5-миллиметровых листов трансформаторной стали. В магните СКД-76 и СКД-55-К листы склеены эпоксидной смолой горячего отверждения, в СКД-55-С1 и СКД-55-С2 - скреплены двумя продольными стальными уголками толщиной 4 мм, сваренными с листовой сталью и торцовыми листами толщиной 8 мм. СП обмотка магнитов выполнена из плоского транспонированного кабеля, параметры которого приведены в таблице.

Изоляция кабеля состоит из двух слоев майларовой ленты толщиной 0,02 мм и шириной 8 мм и одного слоя стеклотенты толщиной 0,08 мм и шириной 4 мм. Стеклотента, пропитанная эпоксидной смолой, спирально наматывалась на кабель с зазором между витками 2-3 мм. Затем кабель наматывался непосредственно на ярмо так, что его широкая сторона была направлена параллельно полюсу магнита. Обмотка фиксировалась приспособлениями, и магнит помещался в печь для полимеризации смолы.

Однослойный вариант обмотки снижает горизонтальную апертуру магнита всего на 10 мм. Торцовые части обмотки изогнуты под углом 90° с радиусом изгиба кабеля 6 мм, поэтому физическая длина магнита мало отличается от длины ярма.

Общий вид магнита СКД-74 приведен на рис. 1.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ МАГНИТОВ

Магниты испытывались в горизонтальном криостате с теплой трубой диаметром 50 или 35 мм, проходящей через рабочую апертуру магнита. Отношение критического тока в магнитах к критическому току короткого образца в зависимости от порядкового номера перехода обмотки в нормальное состояние показано на рис. 2.

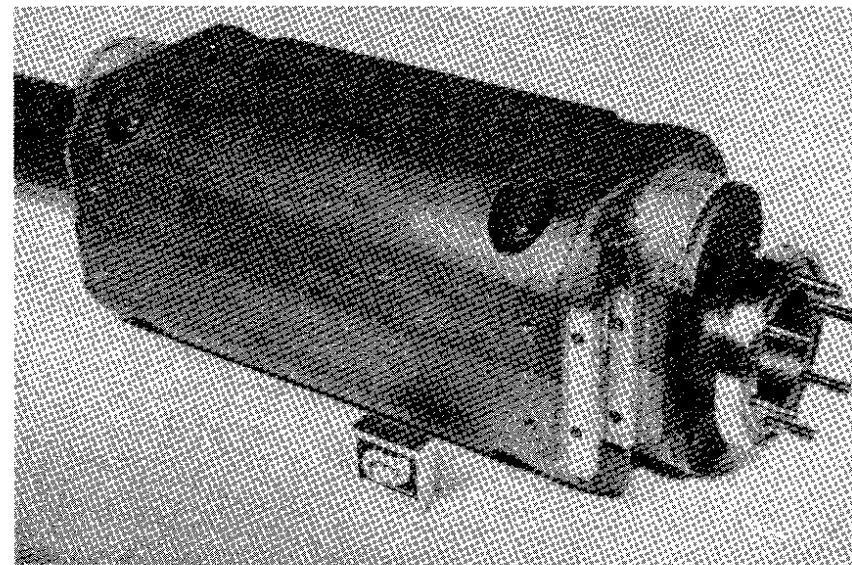


Рис. 1. Общий вид магнита СКД-74.

Максимальные достигнутые величины критических токов и магнитных полей приведены в таблице. Для тренировки магнитов достаточно 5-10 переходов, величины первого и последнего перехода отличаются не более чем на 15%. Всего на каждом магните в процессе испытаний сделано несколько сотен переходов, в результате которых никаких изменений в поведении магнитов не наблюдалось. Магнит СКД-74 трижды охлаждался до температуры жидкого гелия, и при каждом последующем охлаждении критический ток 2880-2900 А достигался при первом переходе.

Величина магнитного поля в центре диполей измерялась ядерным магнитометром, для расчетов использовались системы вычислительных программ POISSON^{/5/} и MAGNET^{/6/}. Зависимость поля в центре магнита СКД-74 от тока обмотки приведена на рис. 3. Кривые возбуждения остальных магнитов аналогичны приведенной

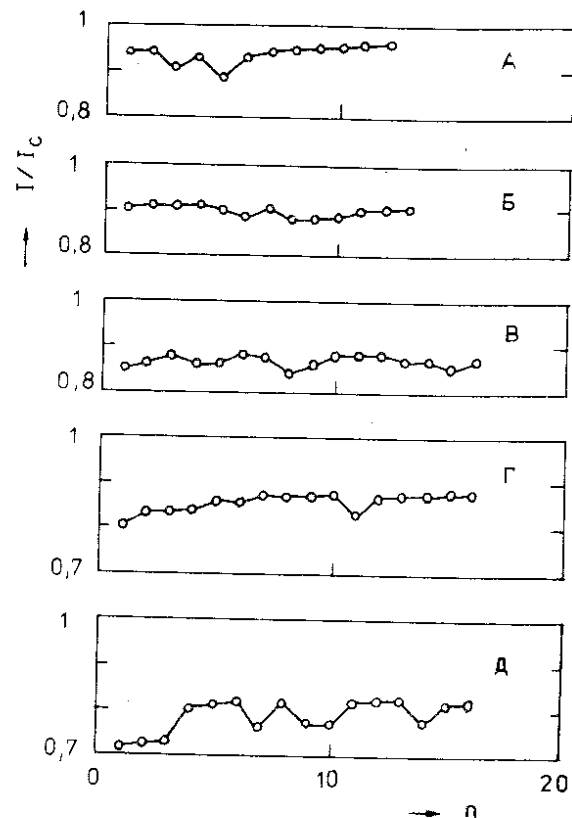


Рис. 2. Отношение критического тока в магнитах к критическому току короткого образца в зависимости от порядкового номера перехода обмотки в нормальное состояние. А - СКД-55-С2; Б - СКД-55-К; В - СКД-55-С1; Г - СКД-74; Д - СКД-76.

на рис. 3. Распределение магнитного поля в медианной плоскости измерялось датчиком Холла при работе магнита в статическом режиме; датчики перемещались в осевом и радиальном направлениях. Радиальное распределение поля в центре магнита СКД-74 на уровне

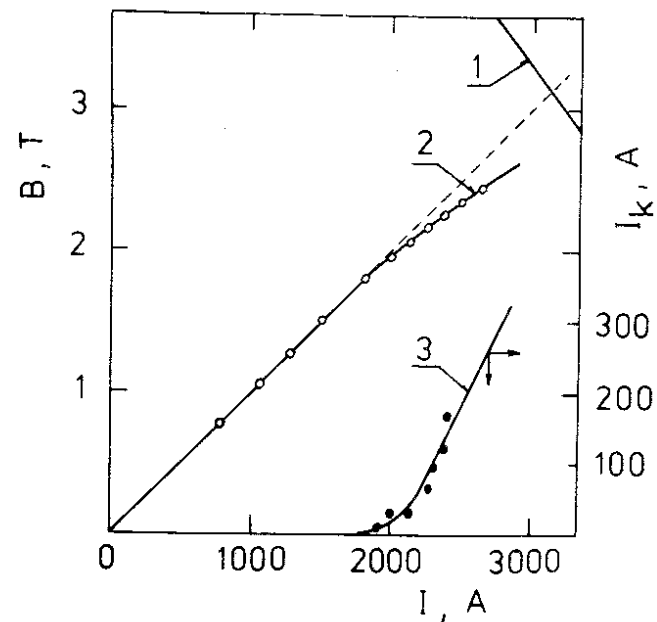


Рис. 3. Магнит СКД-74. 1 - зависимость поля от критического тока в коротком образце кабеля, 2 - зависимость поля в центре магнита от тока обмотки, 3 - зависимость тока в катушке для коррекции поля от тока в магните.

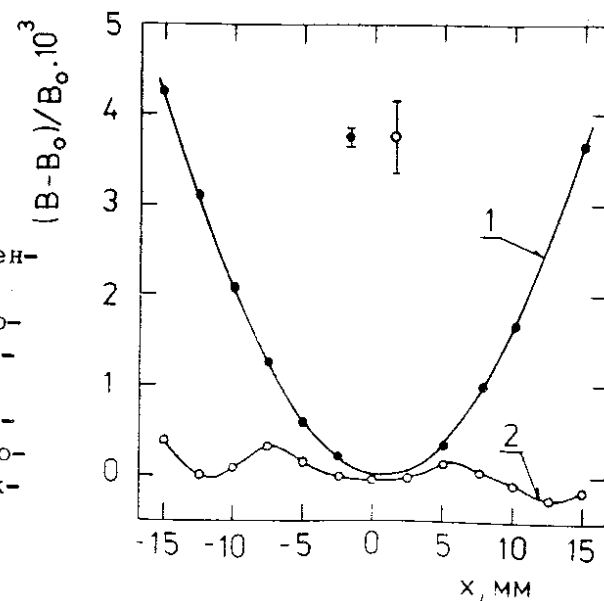


Рис. 4. Измеренное радиальное распределение поля в центре магнита СКД-74 на уровне 2,4Т; 1 - без коррекции поля, 2 - с коррекцией поля.

2,4 Т приведено на рис. 4, результаты расчета распределения поля на уровне 2,6 Т - рис. 5.

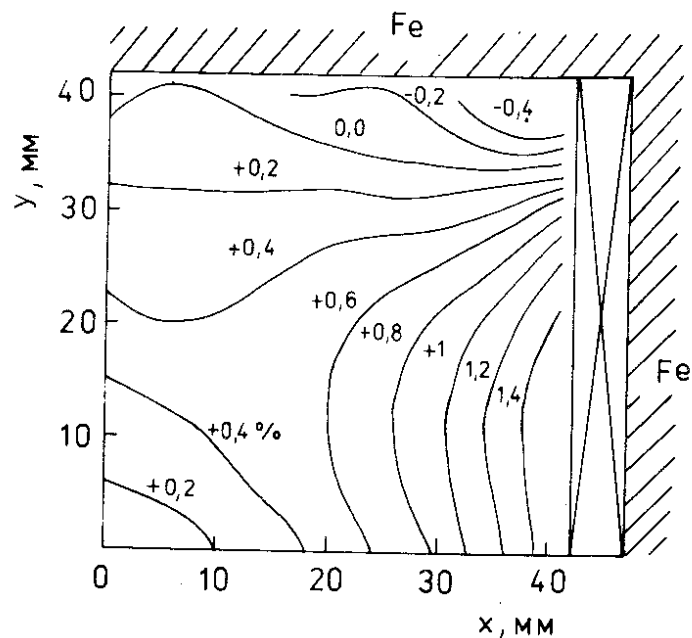


Рис. 5. Расчетное распределение магнитного поля в квадранте апертуры магнита СКД-74 на уровне 2,6 Т.

Расчеты и эксперименты показывают, что в магнитах этого типа основной вклад в нелинейность поля вносит квадратичный член, величина которого, начиная с уровня 1,8 Т, растет практически линейно с полем.

Для коррекции квадратичной нелинейности магнит СКД-74 был снабжен дополнительной обмоткой из NbTi провода диаметром 0,5 мм, состоящей из двух плоских однослойных катушек, расположенных вдоль ярма. Радиальные координаты витков выбирались так, чтобы плотность тока в корректирующей обмотке была пропорциональна радиусу. Обмотка позволяла корректировать величину квадратичной нелинейности магнитного поля

(рис. 4) и одновременно несколько увеличивала дипольную компоненту. Ток корректирующей обмотки, необходимый для компенсации квадратичной нелинейности, в зависимости от величины поля в центре магнита показан на рис. 3.

Измерения распределения магнитного поля в осевом направлении показали, что секступольная компонента поля несколько возрастает на торцах магнита и для ее компенсации потребуется увеличить ток корректирующей обмотки по сравнению с его значением на рис. 3. Эти же измерения показали, что эффективные длины диполей, значения которых приведены в таблице, изменяются с изменением уровня поля всего на 3-4 мм.

Потери в магнитах измерялись электрическим способом [7], а при скоростях свыше 2 Т/с - также и по количеству испаряющегося из криостата жидкого гелия. Магниты возбуждались импульсами тока треугольной формы. Измеренные потери на единицу эффективной длины диполей в зависимости от магнитного поля в их центре при скорости изменения поля 0,25 Т/с приведены на рис. 6. Видно, что для этой скорости изменения поля

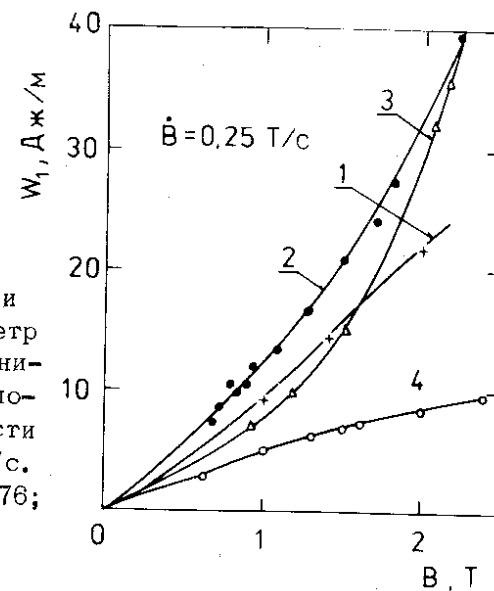


Рис. 6. Потери энергии на один цикл и один метр эффективной длины магнитов в зависимости от поля в центре при скорости изменения поля 0,25 Т/с. 1 - СКД-74; 2 - СКД-76; 3 - СКД-55-С1; 4 - СКД-55-С2.

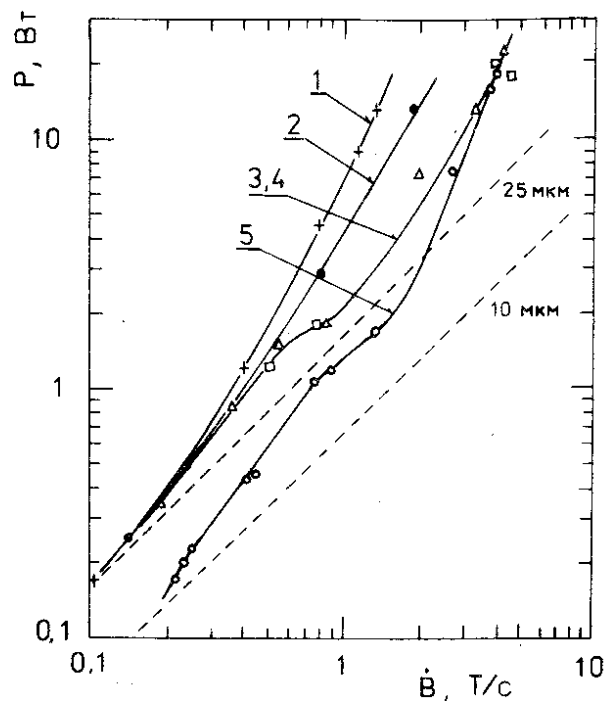


Рис. 7. Зависимость мощности, выделяемой магнитами в непрерывной циклической работе (треугольные импульсы) с амплитудой 1,3 Т, от скорости изменения поля в центре. 1 - магнит СКД-74; 2 - СКД-76; 3,4 - СКД-55-С1; СКД-55-К; 5 - СКД-55-С2. Пунктирными линиями обозначены расчетные гистерезисные потери (без учета кооперативных потерь) для кабеля с нитями диаметром 10 и 25 мкм.

потери зависят в основном от диаметра сверхпроводящих нитей и слабо - от конструктивных отличий в изготовлении ярма (железо шихтованное или нешихтованное, листы клееные или сваренные). Было найдено, что повышенные потери в магните СКД-55-С1 в полях выше 1,5 Т обусловлены плохим соединением двух половин обмотки (активное сопротивление стыка составляло $3 \cdot 10^{-7}$ Ом).

С увеличением скорости изменения магнитного поля все больше проявляются кооперативные потери в кабеле. Это видно из рис. 7, где показаны зависимости мощностей, выделяемых диполями при работе в непрерывном циклическом режиме, от скорости изменения поля. При скорости 4 Т/с потери в диполе СКД-55-С2, обмотка которого содержит сверхпроводящие нити диаметром 10 мкм, достигают величины потерь в магнитах СКД-55-С1 и СКД-55-К с нитями диаметром 25 мкм. Потери в железе вносят заметный вклад в общие потери при скоростях выше 0,5 Т/с в случае диполя СКД-74, для которого в отличие от остальных магнитов магнитопровод сделан из сплошного бруска стали.

При скоростях выше 1 Т/с потери приводят к перегреву обмотки и повышенной деградации критического тока (рис. 8).

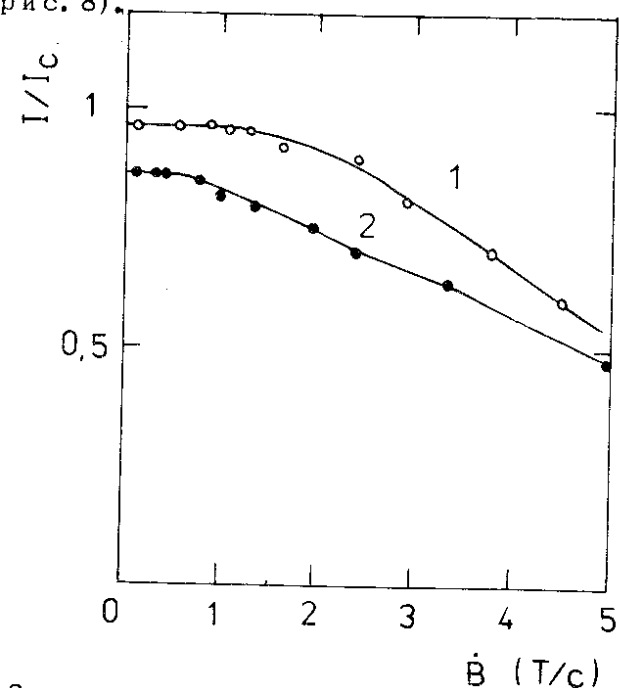


Рис. 8. Зависимость отношения критического тока в магнитах СКД-55-С2 и СКД-55-К к току короткого образца от скорости изменения поля в центре. 1 - СКД-55-С2; 2 - СКД-55-К.

Нами, так же как и авторами работ /8,9,10/, изучалось влияние ориентации плоского сверхпроводящего кабеля в магнитном поле на потери энергии /11/. Зависимости потерь и деградации критического тока от скорости изменения поля в двух соленоидах, последовательно изготовленных из одного и того же куска кабеля (такого же, как у диполя СКД-55-С1), приведены на рис. 9. Соленоиды отличались только ориентацией широкой стороны кабеля в отношении к направлению магнитного поля в их центре. В случае параллельной ориента-

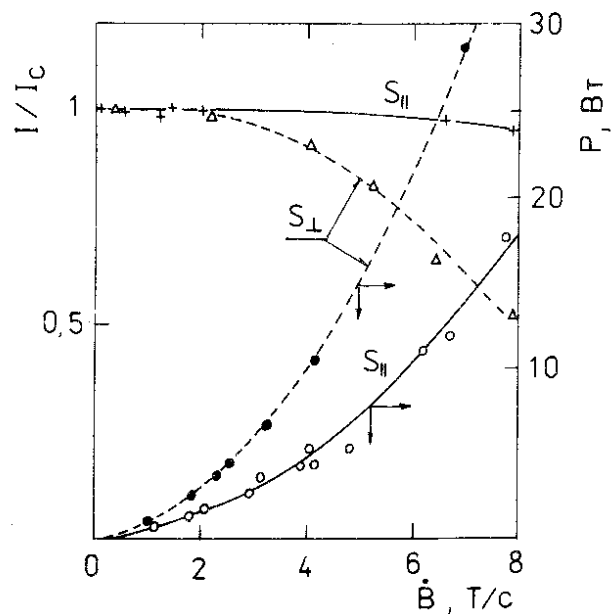


Рис. 9. Результаты измерения зависимости деградации и потерь от \dot{B} для двух соленоидов одинаковых размеров с разной ориентацией плоскости кабеля в обмотке. Пунктирные линии - соленоид с перпендикулярной ориентацией широкой стороны кабеля к направлению поля в центре, сплошные линии - соленоид с параллельной ориентацией кабеля. Возбуждаемые в соленоидах непрерывные импульсы поля имели треугольную форму и амплитуду 1,5 Т.

Таблица I

Обозначение диполя		СКД-74	СКД-76	СКД-55-С1	СКД-55-К	СКД-55-С2
Апертура	мм ²	74x74	76x80	55x55	55x55	55x55
Физическая длина	мм	445	330	400	400	400
Конструкция полуяр-ма		сплошной брусок	листы склеены	листы склеены	листы склеены	листы склеены
Внешние размеры ярма	мм ³	174x184x352	264x288x244	129x139x328	129x139x328	129x139x328
Вес ярма	кг	68	121	33	33	33
Размеры поперечного сечения кабеля	мм ²	0,94x3,7	0,94x3,9	0,92x3,6	0,92x3,6	0,92x3,8
Число проводов \varnothing 0,5 мм в кабеле		13	13	12	12	13
Число сверхпроводящих нитей в проводе		199	199	168	168	1045
Диаметр нитей	мкм	25	25	25	25	10
Отношение сечений меди и сверхпроводника шаг твиста проводов	мм	1/27	1/27	1,6/27	1,6/27	1,56/27
шаг твиста нитей	мм	20	20	5	5	5
длина кабеля в обмотке	м	60	60	50	50	50
Припой		In + добавки ^x	ПОС-40	In + добавки ^x	In + добавки ^x	ПОС-40
Критический ток	A	2900	2480	2270	2353	2600
Критическое поле	T	2,62	2,46	2,25	2,32	2,5
Эффективная длина магнита	мм	397	290	361	361	361
Запасенная энергия	кДж	9,7	5,8	3,1	3,3	4,1

^x Добавки - Zn, Cd, Sn.

ции потери и одновременно также деградация критического тока были существенно ниже, чем при перпендикулярной ориентации. В обмотке диполей типа "оконная рама" вектор поля направлен преимущественно вертикально, поэтому наблюдаемый в соленоидах эффект в диполях должен быть более выражен.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Импульсные сверхпроводящие диполи с однослойной обмоткой типа "оконная рама" для полей до 2,5 Т отличаются простотой конструкции. В исследуемых магнитах наблюдалась низкая деградация критического тока: вплоть до скорости изменения поля 1 Т/с критический ток в магните достигал около 90% величины критического тока в коротком образце. С помощью дополнительных корректирующих обмоток было получено поле достаточно высокого качества. При скорости изменения поля 0,25 Т/с и амплитуде 2,5 Т была достигнута величина суммарных потерь около 10 Дж на один метр длины магнита за цикл. Существенного понижения потерь и одновременно деградации критического тока при больших скоростях изменения магнитного поля можно достигнуть выбором ориентации кабеля в отношении к направлению магнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балдин А.М. и др. В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, Наука, 1975, т. II, с. 4.
2. Allinger J. e a. 'Proceedings of the Fourth Intern. Conf. on Magnet Technology /CONF-720908/, p. 158 /1972/.
3. Allinger J. e a. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1974, NS-20, 3, 678.
4. Allinger J. e a. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1977, NS-24, 3, 1323.
5. Dorst J.H. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1965, No 5, 12, 412.
6. Iselin C. Proc. of the Third Intern. Magnet. Conf., Hamburg, 83 /1970/.
7. Хованец Ф. и др. ОИЯИ 8-9918, Дубна, 1976.
8. Wilson M.N. Rutherford Lab., Preprint RHEL/M/A26, 1972.

9. Гласник И. ИАЭ Курчатова, ИАЭ-2760, Москва, 1976.
10. Yamada R., Ishimoto H., Price M.E. IEEE Trans. Magnetics, 1977, MAG-13, 552.
11. Хованец Ф. и др. ОИЯИ, Р8-11145, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 июня 1978 года.