

С 393

X-683

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



3/10-78

P8 - 11145

1556/2-78

Ф.Хованец, Е.И.Дьячков, П.И.Никитаев,
Г.Г.Ходжибагян, Л.Яншак

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ТРАНСПОНИРОВАННОГО
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО КАБЕЛЯ В ОБМОТКЕ
НА ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ
В ИМПУЛЬСНЫХ СОЛЕНОИДАХ

1978

P8 - 11145

**Ф.Хованец, Е.И.Дьячков, П.И.Никитаев,
Г.Г.Ходжибагян, Л.Яншак**

**ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ТРАНСПОНИРОВАННОГО
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО КАБЕЛЯ В ОБМОТКЕ
НА ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ
В ИМПУЛЬСНЫХ СОЛЕНоиДАХ**

Хованец Ф. и др.

P8 - 11145

Влияние ориентации транспонированного сверхпроводящего кабеля в обмотке на потери энергии в импульсных соленоидах

Изучалось влияние ориентации плоского транспонированного кабеля с металлической пропиткой на потери в импульсных сверхпроводящих соленоидах. Найдено, что выбором ориентации кабеля в обмотке можно достигнуть одновременно уменьшения потерь и деградации критического тока при больших скоростях изменения магнитного поля.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Chovanec F. et al.

P8 - 11145

Effect of the Transposed Superconducting Cable Orientation on the Energy Losses in Pulsed Solenoids

The effect of a flat transposed metallic impregnated cable orientation on the A.C. losses in pulsed superconducting solenoids has been investigated.

It was found, that the A.C. losses and degradation of a critical current at higher magnetic field change rates can be reduced by the suitable orientation of the superconducting cable in the coil winding.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

Сверхпроводящие транспонированные кабели прямоугольного сечения с металлической пропиткой отличаются хорошей стабильностью и позволяют получать высокую конструктивную плотность тока. Но, с другой стороны, известно ^{/1/}, что в импульсных магнитах, изготовленных из такого кабеля, потери могут быть значительно большими, чем в кабелях с изолированными проволоками. Вильсон ^{/2/} показал, что в плоском транспонированном кабеле, пропитанном припоем, потери больше в том случае, когда магнитное поле направлено перпендикулярно его широкой стороне. Подобные результаты получил Гласник ^{/3/} при расчете потерь в ленточном многожильном сверхпроводнике из Nb_3Sn . Ямада и др. ^{/4/} наблюдали сильную анизотропию потерь от направления магнитного поля при исследовании коротких образцов кабеля для проекта "Даблер". В связи с этим возникает вопрос: как влияет выбор ориентации кабеля в обмотке на суммарные потери?

В настоящей статье приведены результаты измерения потерь в двух соленоидах с разной ориентацией плоского кабеля в обмотке. Показано, что для того же кабеля с металлической пропиткой можно за счет выбора ориентации существенно понизить потери и деградацию критического тока при увеличении скорости нарастания магнитного поля.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Структура обмоток исследуемых соленоидов приведена на рис.1. Кабель 1 состоит из 12 проволок диамет-

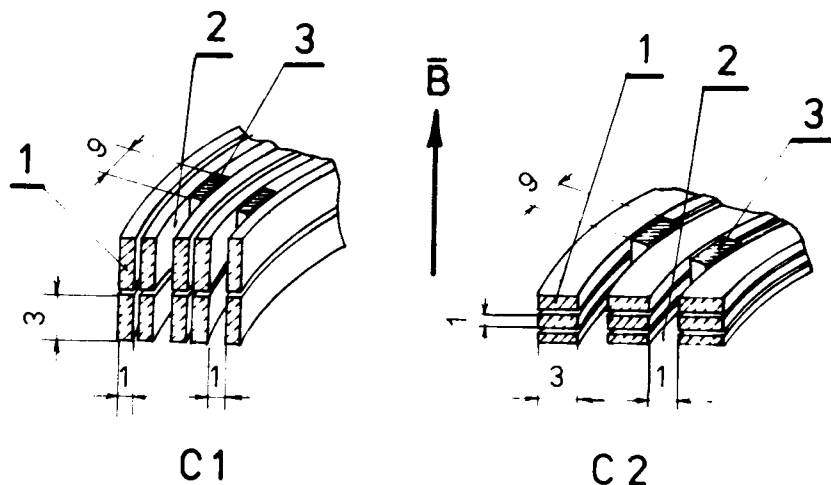


Рис.1. Структура обмотки соленоидов С1 и С2. 1 - сверхпроводящий кабель; 2 - охлаждающий канал; 3 - прокладка.

ром 0,5 мм, содержащих скрученные сверхпроводящие нити из сплава НТ-50 диаметром 24 мкм. Матрица проволок - медная. Проволоки скручены в аксиальном направлении, обжаты для придания кабелю прямоугольной формы и пропитаны сплавом на основе In (добавки: кадмий, олово и цинк). Параметры кабеля приведены в табл.1.

Кабель сначала наматывался на текстолитовый каркас таким образом, чтобы его широкая сторона была направлена параллельно вектору магнитного поля в центре соленоида. Для создания охлаждающих каналов 2 (рис.1) внутрь обмотки через каждые два ее слоя в аксиальном направлении вкладывались прокладки 3 толщиной 1 мм и шириной 9 мм. Снаружи обмотка стягивалась биндажом из нержавеющей проволоки. Обмотка была намотана так, что конец кабеля, имеющий более

Таблица 1

Размеры	мм	3xI
Количество проволок		12
Диаметр проволок	мм	0,5
Количество сверхпроводящих нитей на проволоку		168
Диаметр сверхпроводящих нитей	мкм	24
Матрица проволок		медь
Шаг скрутки проволок	мм	20
Шаг скрутки нитей	мм	5
Коэффициент заполнения кабеля сверхпроводником		0,329
Припой		сплав на основе индия
Изоляция		капроновая ткань
Толщина изоляции	мм	0,2
Критический ток кабеля в поле 5Т (один конец)	А	1600
-"-" (другой конец)	А	1450
Гистерезисные потери на см ³ кабеля в поле 5Т (измерены в треугольном цикле)	мДж см ⁻³ /цикл	43

Таблица 2

Соленоид		С1	С2
Внутренний диаметр обмотки	мм	40	40
Наружный диаметр обмотки	мм	85	81
Высота обмотки	мм	95	95
Длина кабеля в обмотке	м	51	51
Критический ток	А	1490	1520
Максимальное поле в центре	Т	4,6	5,15

низкое значение критического тока в поле 5Т, располагался во внутреннем слое. Соленоид с такой структурой обмотки будем в дальнейшем обозначать С1.

После испытания соленоида С1 на тот же самый каркас наматывался тот же кабель, но, в отличие от предыдущего случая, широкая сторона кабеля была направлена перпендикулярно полю в центре (рис.1). Прокладки 3 вкладывались через каждый слой, снаружи обмотка также стягивалась бандажом. Обмотка наматывалась так, что конец кабеля, имеющий более низкое значение критического тока в поле 5Т, располагался в наружном слое. Этот соленоид будем в дальнейшем обозначать С2. Основные характеристики обоих соленоидов приведены в табл.2.

Критический ток в соленоидах определялся из разбаланса мостика, составленного из двух половин обмотки соленоида и двух сопротивлений. Источник тока 3000 А/7В отключался в случае, когда на скомпенсированном мостике появлялся сигнал, превышающий 200 мВ. Потери измерялись системой, описанной в/6/. Результаты, полученные электрическим способом по Вильсону /7/, сопоставлялись с измерением потерь по испаряемости жидкого гелия из криостата.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис.2. приведены характеристики соленоидов С1, С2 и образцов, взятых с противоположных концов кабеля, из которого были изготовлены соленоиды С1 и С2. Буквами С1 и С2 обозначены прямые, определяющие константы между током и полем в области его максимального значения в обмотках соленоидов С1 и С2. Зачерненными кружками обозначены значения токов переходов соленоидов в нормальное состояние. В соленоиде С1 критический ток короткого образца был достигнут после третьего, в соленоиде С2 - после пятого перехода в нормальное состояние. В соленоиде С2 было достигнуто более высокое поле, чем в С1 из-за более высокого критического тока участка кабеля,

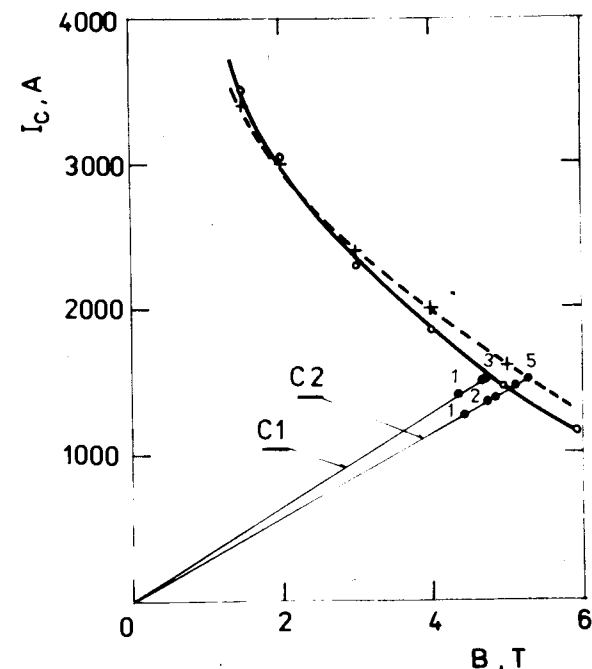


Рис.2. Характеристики соленоидов С1, С2 и образцов кабеля. ● - токи переходов соленоидов в нормальное состояние при $B \leq 0,5$ Т/с. (Цифры обозначают порядковый номер переходов). ○ - токи переходов в нормальное состояние образца кабеля из внутреннего слоя обмотки С1; + - то же для образца кабеля из внутреннего слоя обмотки С2.

находящегося в области максимального поля, и более высокого коэффициента заполнения обмотки сверхпроводником.

На рис.3 показана деградация критического тока J_c в соленоидах. Видно, что, в отличие от соленоида С1, в соленоиде С2 наблюдается сильная деградация критического тока с увеличением скорости изменения поля.

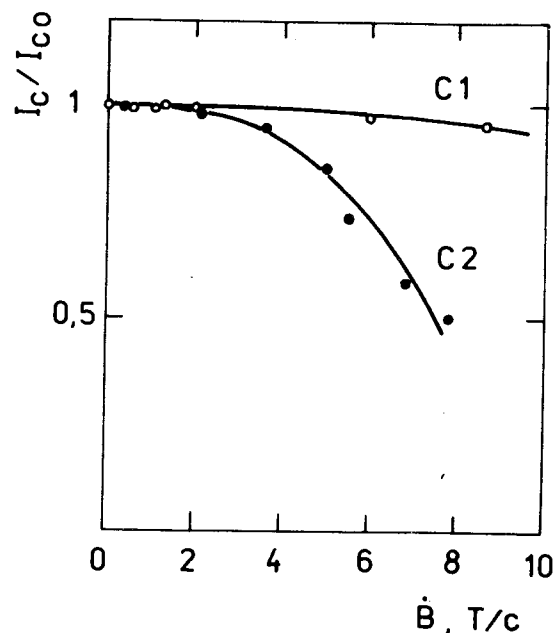


Рис.3. Зависимость степени деградации критического тока J_c/J_{c0} соленоидов C1 и C2 от \dot{B} в центре. J_{c0} получено при $\dot{B} \leq 0,5$ T/c.

Потери измерялись в циклическом режиме, непрерывные импульсы тока и поля имели форму равнобедренного треугольника без пауз с максимальным значением поля B_M . На рис.4. приведены результаты измерения зависимости потерь энергии за один цикл от амплитуды поля в центре соленоидов, полученные электрическим способом. При медленном нарастании поля потери в обоих соленоидах практически были одинаковы (пунктирная линия). С увеличением скорости нарастания поля ситуация изменилась. В соленоиде C2 потери больше, чем в соленоиде C1 (сплошные линии). На рис.5. показано отношение общих потерь к гистерезисным в зависимости от скорости изменения магнитного поля в соленоидах C1 и C2. Гистерезисные потери получены эк-

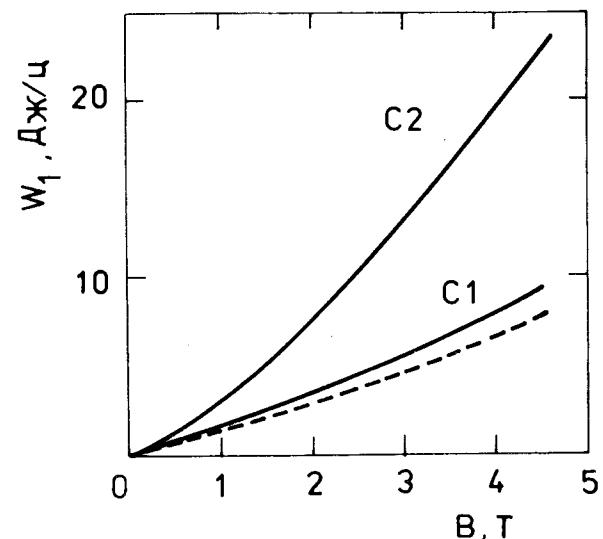


Рис.4. Зависимость потерь энергии за один цикл от магнитного поля в центре соленоидов C1 и C2 для разных скоростей изменения поля. Пунктирная линия - скорость изменения поля в центре C1 и C2, равная 0,5 T/c; сплошные линии - скорость, равная - 3,4 T/c.

страполяцией общих потерь к нулевой скорости изменения поля и были одинаковы для обоих соленоидов.

На рис.6 приведены зависимости мощности тепловыделений в соленоидах C1 и C2 при непрерывной циклической работе, от скорости изменения магнитного поля, полученные электрическим методом и по испаряемости жидкого гелия из криостата.

Из этого видно, что примененный кабель отличается большой анизотропией потерь. Деградацию критического тока с увеличением скорости изменения поля в соленоиде C2 можно, по-видимому, объяснить более высокими потерями, в отличие от соленоида C1, а также худшими условиями охлаждения поверхности кабеля.

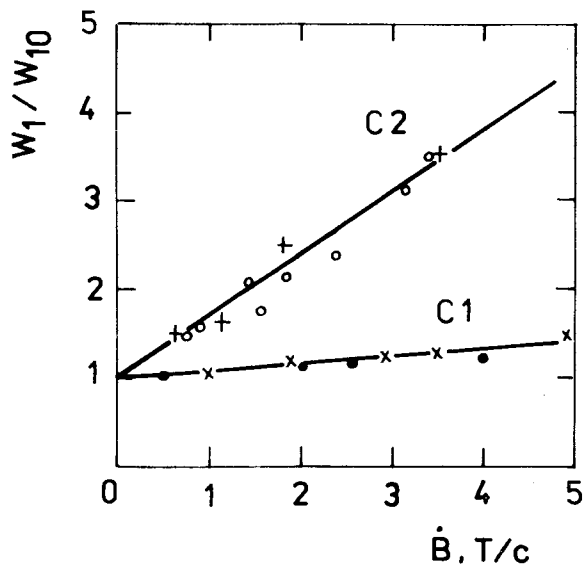


Рис.5. Зависимость отношения общих потерь энергии W_1 к величине потерь W_{10} от скорости изменения поля \dot{V} в центре соленоидов C1 и C2. W_{10} получено экстраполяцией общих потерь к нулевой скорости изменения поля. • - для соленоида C1 и максимального значения поля $V_M = 2T$; O - C2, $V_M = 2T$; x - C1, $V_M = 4,1T$; + - C2, $V_M = 4,1T$.

ВЫВОДЫ

Плоские транспонированные сверхпроводящие кабели с металлической пропиткой отличаются большой анизотропией потерь от ориентации кабеля в магнитном поле. Выбором ориентации кабеля в обмотке магнита можно одновременно достичь уменьшения потерь и деградации критического тока при увеличении скорости изменения поля. Деградация, по-видимому, связана с величиной мощности тепловыделений и условиями теплоотвода в области максимального поля в обмотке.

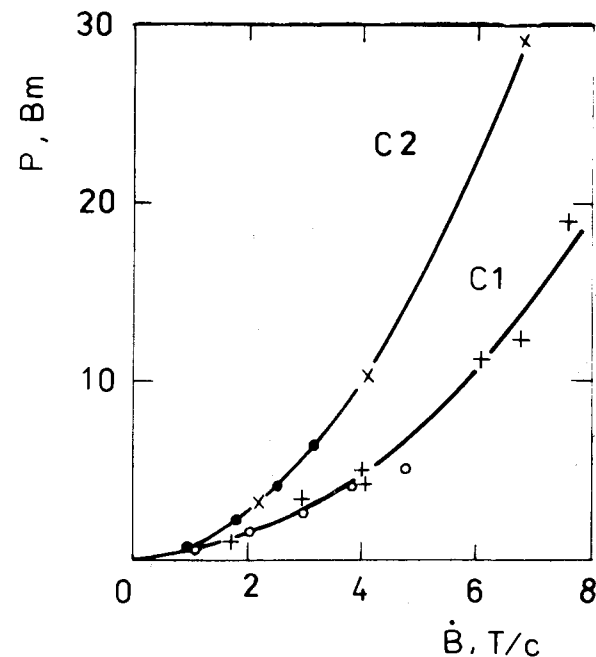


Рис.6. Зависимость мощности P , выделяемой соленоидами при циклической работе, от скорости изменения поля \dot{V} в центре соленоидов C1 и C2. Кривые получены при максимальном значении поля $V_M = 2T$: + x - получены по испаряемости жидкого гелия, O • - электрическим методом.

Авторы выражают благодарность А.Г.Зельдовичу, Л.Г.Макарову, А.А.Смирнову, И.А.Шелаеву за постоянный интерес к работе и полезные обсуждения, а также сотрудникам криогенного и электротехнического отделов ЛВЭ ОИЯИ, принимавшим участие в подготовке и проведении эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brechna H. Superconducting Magnet System, Springer Verlag, Berlin 1973.
2. Wilson M.N. Preprint RHEL/M/A, 1972, p.26.
3. Hlásník I., Elektrotech. čas., 1975, 26, p.259.
4. Yamada R., Ishimoto H., Price M.E. IEEE Trans.Mag., MAG-13, 1977, p.552.
5. Хованец Ф. и др., ОИЯИ, 8-9918, Дубна, 1976.
6. Wilson M.N. Cryogenics, 1973, 13, p.361.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 декабря 1977 года.