

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



12/21-78

P8 - 11384

K-795

Л.Кремпаски, М.Полак, Ф.Хованец, Ф.Штофаник

2646/2-78

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ АНИЗОТРОПИИ
НАМАГНИЧЕННОСТИ
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЕЙ

1978

Кремпаски Л. и др.

P8 - 11384

Метод измерения анизотропии намагниченности
сверхпроводящих кабелей

Описывается метод измерения намагниченности сверхпроводников с помощью двух датчиков Холла, позволяющий определить анизотропию гистерезисных потерь. Приведены результаты измерений транспонированного кабеля сечением $3 \times 1 \text{ мм}^2$, содержащего сверхпроводящие нити диаметром 24 мкм, в магнитных полях до 4Т. Полученные результаты сравниваются с предсказаниями теории.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Krempasky L. et al.

P8 - 11384

Method for Measuring Magnetization Anisotropy
in Superconducting Cables

A method for measuring magnetization and A.C. losses anisotropy in superconducting cables using two Hall generators is described. The experimental results on $3 \times 1 \text{ мм}^2$ flat superconducting cable with 24 $\mu\text{м}$ filaments in magnetic fields up to 4T are compared with the theory predictions.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research.

Dubna 1978

Чтобы провести сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований потерь в импульсных сверхпроводящих магнитах, необходимо знать параметры кабелей, из которых изготовлены обмотки этих устройств.

Ниже рассмотрен метод, позволяющий измерять анизотропию намагниченности коротких образцов сверхпроводящих кабелей и проволоки. Показаны результаты измерений транспонированного сверхпроводящего кабеля сечением $3 \times 1 \text{ мм}^2$. На основе параметров петли намагничивания образца, которую рисует перо самописца, определены гистерезисные потери, зависимость критического тока от поля и коэффициент заполнения кабеля сверхпроводником. Результаты сравнены с данными прямых измерений вышеперечисленных величин и с теорией.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

При измерениях исходили из методики, описанной в работе ^{1/}. Эта методика была несколько изменена: вместо образцов в виде катушек использовались образцы в виде кубиков. Поворачивание кубиков на 90° позволяло осуществить измерения в трех направлениях относительно магнитного поля.

Из 4-х кубиков, склеенных из кусков измеряемого кабеля, были составлены два полусных наконечника /рис. 1/. Наконечники помещались в зазор сверхпроводящего соленоида, создающего внешнее магнитное поле. Вследствие намагниченности образца поле в центре за-

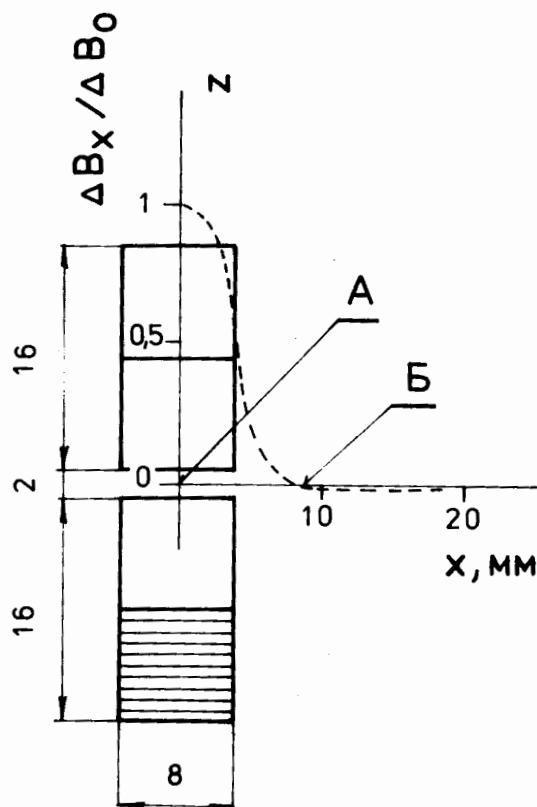


Рис. 1. Форма полюсных наконечников при измерении намагниченности. Штриховая линия представляет относительное распределение магнитного поля от образца, намагниченного вдоль оси z . Буквами А, Б обозначено расположение датчиков Холла.

зона между полюсами отличается от внешнего поля на величину ΔB_0 , причем

$$\Delta B_0 = k_0 M \quad /1/$$

где M - намагниченность образца в направлении оси z , k_0 - геометрический фактор^{/2/}, который в нашем случае равен 0,74.

Распределение магнитного поля от образца, намагниченного вдоль оси z , изображено штриховой линией на рис. 1. Буквами А и Б обозначено расположение двух датчиков Холла. Как видно из рис. 1, датчик А измеряет поле от намагниченного образца плюс внешнее поле и датчик Б измеряет только внешнее поле. Датчики запитывались отдельными токами и были соединены так, чтобы холловские напряжения имели противоположные знаки. Токи датчиков настраивались таким образом, чтобы в случае отсутствия образца холловские напряжения полностью компенсировали друг друга. После установки образца возникает разбаланс напряжений, пропорциональный намагниченности. Петли намагничивания образца регистрировались на двухкоординатном самописце, причем на одну ось подавалось напряжение с шунта в цепи питания магнита и на другую ось - напряжение с датчиков Холла. Преимущество данного метода заключается в том, что в отличие от других методов он не требует применения интегратора, дрейф которого ограничивает чувствительность и точность измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерялись параметры плоского транспонированного сверхпроводящего кабеля с металлической пропиткой, размеры которого показаны на рис. 2. Кабель состоял из 12-ти проволок диаметром 0,5 мм. Каждая проволока содержала 168 сверхпроводящих нитей из сплава НТ-50 диаметром 24 мкм, скрученных с шагом 5 мм и погруженных в медную матрицу. Получаемые кривые намагничивания показаны на рис. 3-5. Заштрихованная площадь на рис. 3 пропорциональна потерям за цикл в случае, когда импульс имеет форму треугольника или трапеции /магниты циклических ускорителей/. Довольно необычную форму имеют петли намагниченности в случае, когда поле направлено вдоль длины кабеля /составляющая B_y ,

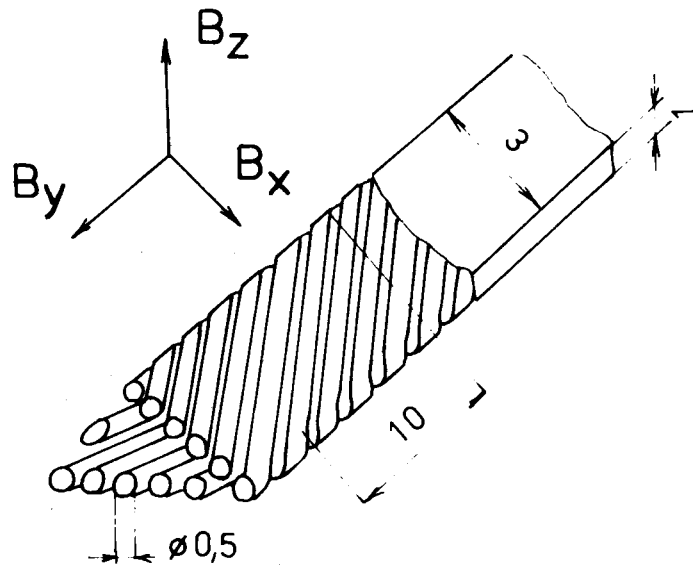


Рис. 2. Образец сверхпроводящего кабеля.

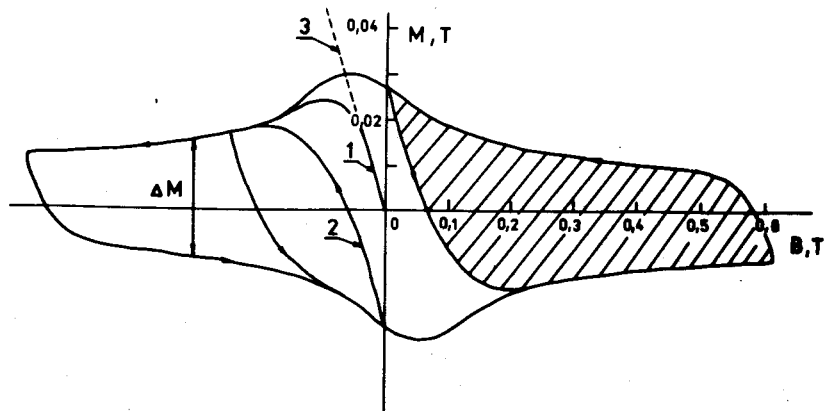


Рис. 3. Петля намагниченности образца в малых полях.
 $\dot{B} = 0,05 \text{ T/c/}$.

6

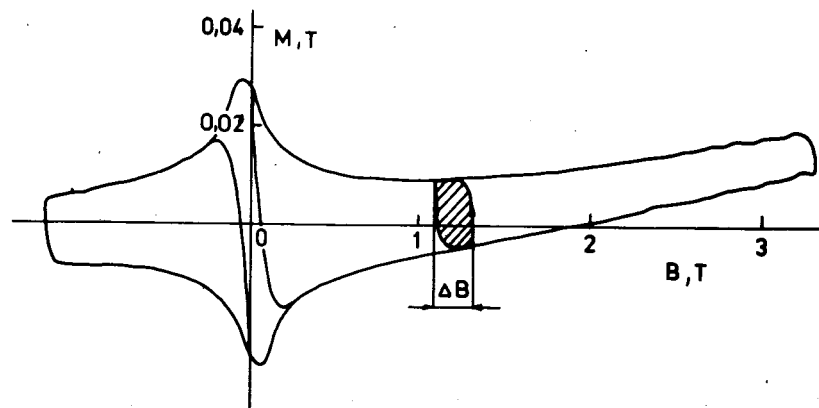


Рис. 4. Петля намагниченности образца в больших полях.
 $\dot{B} = 0,05 \text{ T/c/}$.

рис. 2/. Это, по-видимому, связано с тем, что в отличие от направления B_x или B_z критический ток не достигает максимальной величины в нулевом поле^{3/}. Смещение петли на рис. 4 в области полей свыше 1Т вызвано неполной компенсацией напряжений на датчиках А и Б и их нелинейностью.

Потери энергии за цикл в случае магнитного поля, создаваемого импульсом треугольной формы, при разной ориентации кабеля представлены на рис. 6, в случае поля, создаваемого пилообразным импульсом, - на рис. 7. Видно, что когда поле направлено параллельно или перпендикулярно широкой стороне кабеля, потери одинаковы. При продольной ориентации магнитного поля потери больше в полях, превышающих 2Т.

В работе^{4/} показано, что по ширине петли намагничивания ΔM /рис. 3/ можно определить критический ток, который дается формулой

$$I_c = \frac{\Delta M}{\mu_0 d} F, \text{ Ам}^{-2}, \quad /2/$$

где: d - диаметр сверхпроводящих нитей, F - площадь поперечного сечения кабеля.

На рис. 8 показаны результаты, полученные при использовании уравнения /2/ и сравненные с данными

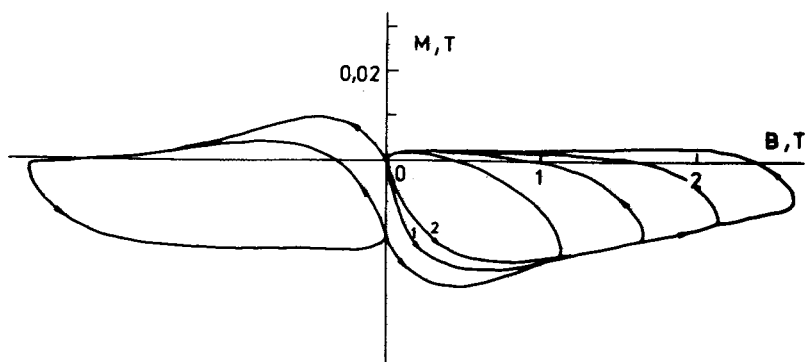


Рис. 5. Петля намагниченности образца для продольной ориентации поля.

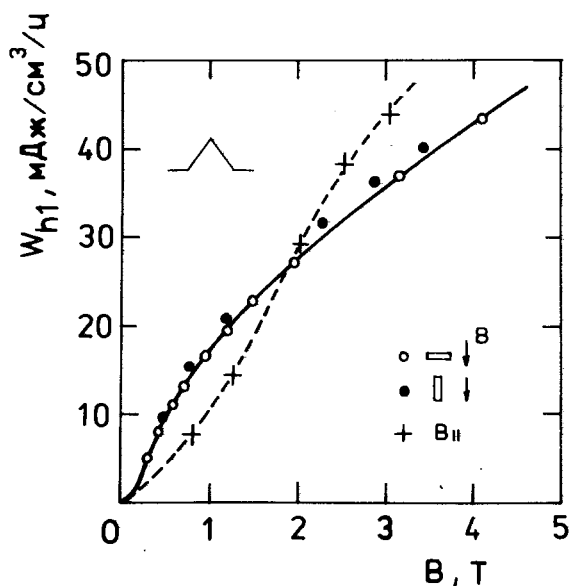


Рис. 6. Зависимость гистерезисных потерь от величины поля, создаваемого импульсами треугольной формы. Потери относятся к 1 см^3 кабеля.

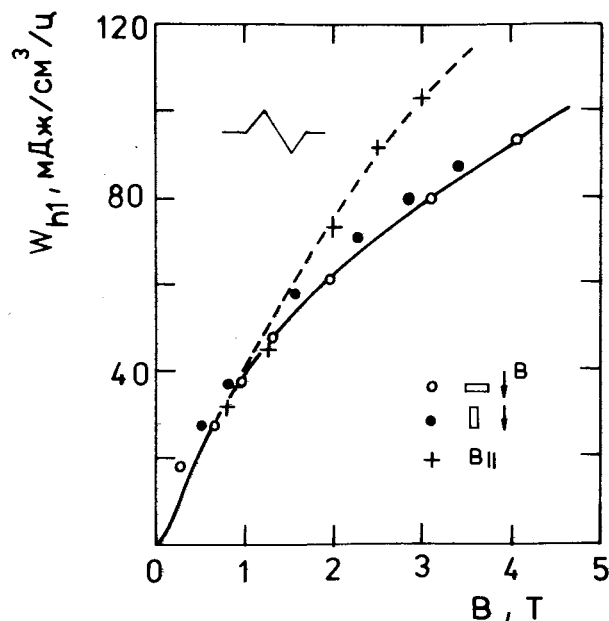


Рис. 7. Зависимость гистерезисных потерь от величины поля, создаваемого импульсами пилообразной формы. Потери относятся к 1 см^3 кабеля.

прямых измерений критических токов. В данном случае определение критических токов по кривой намагничивания более выгодно, потому что при прямых измерениях необходимо в криостат заводить большие токи, порядка нескольких кА.

Из касательной 3 к кривой 1 /рис. 3/ первичного намагничивания в области слабых полей определялся коэффициент заполнения кабеля сверхпроводником λ , который дается уравнением

$$\lambda = - \frac{M}{2B} . \quad /3/$$

Коэффициент λ , полученный исходя из среднего диаметра нитей 24 мкм, общего числа нитей 12×168 и сечения кабеля $3 \times 1 \text{ мм}^2$, равнялся 0,335. Из уравнения /3/ получаем величину λ , равную 0,329.

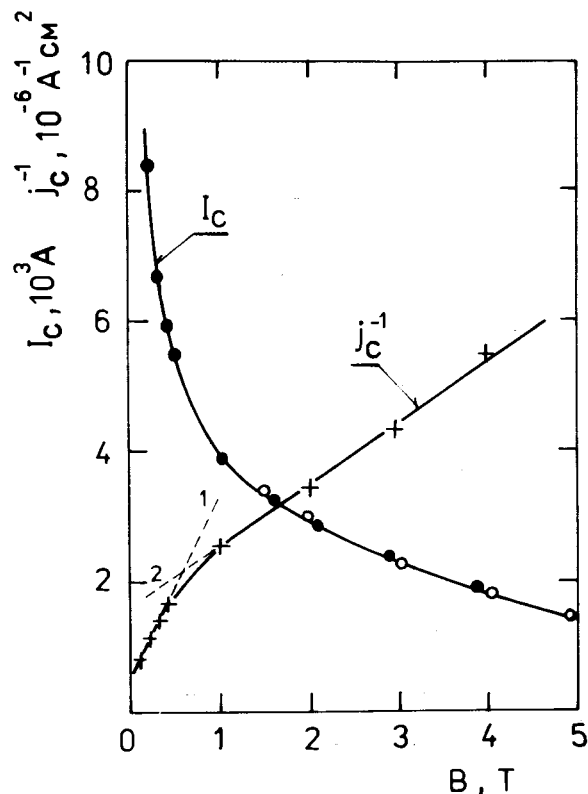


Рис. 8. Зависимость критического тока от поля. \circ - прямое измерение, \bullet - определено по намагниченности образца.

Для сравнения экспериментальных результатов с теорией были определены постоянные сверхпроводящего материала a_c и B_0 и введены коэффициенты λ_1 и λ_2 . Параметры a_c и B_0 характеризуют зависимость критической плотности тока в сверхпроводнике от поля и определяются из уравнения Кима

$$j_c = \frac{a_c}{B + B_0} \quad /4/$$

В области малых полей /прямая 1, рис. 8/ получаем $a_c = 0,345 \cdot 10^{10} \text{ ATm}^{-2}$ и $B_0 = 0,19 \text{ T}$. В области полей больше чем $0,5 \text{ T}$ $a_c = 1,06 \cdot 10^{10} \text{ ATm}^{-2}$ и $B_0 = 1,59 \text{ T}$. λ_1 - коэффициент заполнения пластины сверхпроводником.

Пластина ориентирована параллельно магнитному полю, и ее толщина равна диаметру сверхпроводящих нитей. Коэффициент λ_1 определяется только в области сечения кабеля, заполненного сверхпроводящими нитями, и дается выражением

$$\lambda_1 = \frac{\pi d^2}{4} \frac{1}{d(d+W)}, \quad /5/$$

где W - расстояние между нитями.

Коэффициент λ_2 определен из отношения площадей, занимаемых сверхпроводящими нитями, и сечения кабеля и дается выражением

$$\lambda_2 = N \frac{\pi D'^2}{4F}, \quad /6/$$

где N - число проволок в кабеле, D' - диаметр, ограничивающий сверхпроводящие нити, F - сечение кабеля.

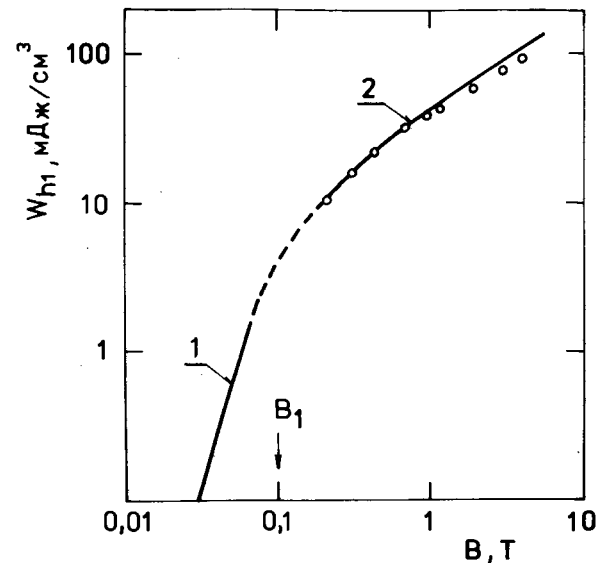


Рис. 9. Сравнение расчетных и экспериментальных данных: — - теория, \circ - эксперимент.

Коэффициент заполнения кабеля сверхпроводником определяется как произведение $\lambda_1 \lambda_2$.

Формулы для расчета потерь приводятся для двух областей: области полей ниже поля полного проникновения B_1 и области больше B_1 . B_1 определяется как

$$B_1 = (2\lambda_1 a_c \mu_0 d + B_0^2)^{1/2} - B_0 \quad /7/$$

Подставляя соответствующие величины λ_0 , a_c и B_0 , получаем, что в нашем случае $B_0 = 0,1$ Т.

Для $B < B_1$ и полного цикла потери подсчитываются из уравнения /5/.

$$W_{h1} = \frac{4}{3} \frac{\lambda_2}{d} \frac{B_M^3 (B_0 + B_M)}{\lambda_1 \mu_0^2 a_c}, \quad \text{Джм}^{-3} / \text{цикл.} \quad /8/$$

Для $B > B_1$

$$W_{h1} = \lambda_1 \lambda_2 d a_c \left\{ \ln \left(1 + \frac{B_M}{B_c} \right) - \frac{\lambda_1 d a_c \mu_0}{3 (B_0 + B_M) B_M} \right\}, \quad \text{Джм}^{-3} / \text{цикл.} \quad /9/$$

Сравнение теоретических и экспериментальных данных для измеряемого образца кабеля приведено на рис. 9. Кривая 1 соответствует уравнению /8/, кривая 2 - уравнению /9/, экспериментальные точки были получены на основе результатов, представленных на рис. 3 и 4. Параметры кабеля приведены в сводной таблице.

Для практических целей важно знать, как влияют пульсации тока на потери. Изменение магнитного поля на величину ΔB вызовет появление парциальных петель намагничивания /рис. 4, заштрихованная область/. На рис. 10 приведена зависимость отношения площади парциальной петли к общей площади петли намагничивания от амплитуды изменения поля ΔB для разных полей.

Видно, что влияние ΔB более заметно в области низких полей, где петля намагничивания шире. С помощью рис. 10 можно определить влияние пульсаций

Таблица

Размеры, мм	3x1
Диаметр жил, мм	0,5
Количество жил	12
Шаг скрутки жил, мм	20
Диаметр сверхпроводящих нитей, мкм	24
Число нитей на жилу	168
Шаг скрутки нитей, мм	5
Коэффициент заполнения	0,33
Критический ток в поле 5 Т, А	1450
Параметр a_c , поле $< 0,5$ Т, 10^{10} Атм $^{-2}$	0,345
"-" " " $> 0,5$ Т, "-"	1,06
Параметр B_0 , поле $< 0,5$ Т, Т	0,19
"-" " " $> 0,5$ Т, "-"	1,59
Поле полного проникновения B_1 , Т	0,1
Гистерезисные потери для цикла треугольной формы в поле 3 Т, перпендикулярном широкой стороне образца, $B = 0,05$ Т/с, мДжсм $^{-3}$ /цикл	36
в поле, параллельном широкой стороне образца, " - "	37
в поле вдоль длины кабеля, " - "	44

тока источника на общие потери. Например, в случае шестифазного выпрямителя частота первой гармоники 300 Гц и амплитуда пульсаций напряжения - 5,7%. Амплитуда пульсаций тока зависит от напряжения ис-

точника и индуктивности нагрузки. Пульсации тока величиной 1% в данном случае уже не приемлемы, так как в области полей 2 Т за одну секунду они вызовут повышение потерь на величину более 100%. В большинстве реальных случаев /напряжение источника - меньше чем 50 В, индуктивность магнита - более 10^{-3} Гн/ пульсации тока намного меньше чем 1%. Однако вопрос пульсаций заслуживает внимания в случае магнитов с малой индуктивностью при медленном изменении магнитного поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью методики, использующей два датчика Холла, была измерена анизотропия гистерезисных потерь, критические токи и другие параметры сильноточ-

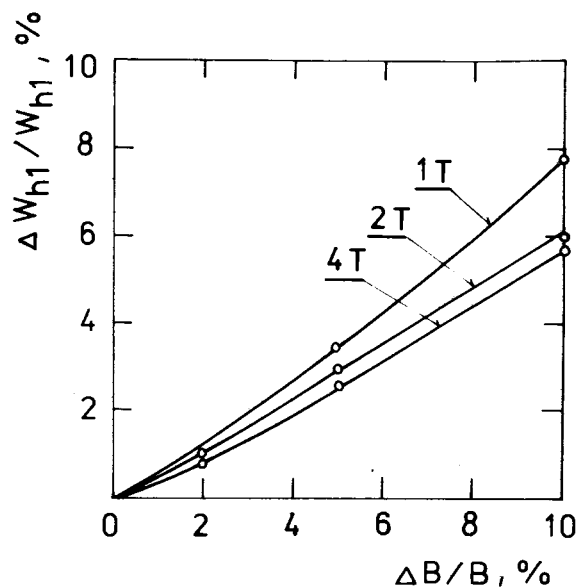


Рис. 10. Зависимость относительного изменения гистерезисных потерь от относительного изменения магнитного поля. Кривые соответствуют разным величинам магнитных полей.

ного сверхпроводящего кабеля. Преимущество данного метода заключается в применении простой схемы измерения и в том, что с его помощью можно определять потери и критические токи для трех направлений магнитного поля относительно образца. Сравнение полученных результатов с данными прямых измерений и с теорией показало хорошее согласие. В работе обсуждалось также влияние пульсаций источника тока на гистерезисные потери в магнитах. Показано, что для данного кабеля пульсации тока должны быть меньше 1%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kremfasky L. *Cryogenics*, 1976, 16, p.178.
2. Montgomery D.B. *Preprint AFOSR-1526, MIT Cambridge*, 1961.
3. Enderlein G. e.a. *Cryogenics*, 1973, 13, p.426.
4. Fietz W.A. e.a. *Phys. Rev.*, 1964, 136, A335.
5. Hancox R. *Proc. IEEE*, 1966, 113, no. 7.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 марта 1978 года.