

9918

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



9918

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

8 - 9918

Ф.Хованец, Е.И.Дьячков, И.А.Курсков, П.И.Никитаев,
А.А.Смирнов, Г.Г.Ходжибагиян

СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ
В ИМПУЛЬСНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТАХ

1976

8 - 9918

Ф.Хованец, Е.И.Дьячков, И.А.Курсков, П.И.Никитаев,
А.А.Смирнов, Г.Г.Ходжибагиян

СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ
В ИМПУЛЬСНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТАХ

В Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований в связи с разработкой проекта ускорителя релятивистских ядер НУКЛОТРОНА ^{1, 2/} создан стенд, предназначенный для исследований импульсных сверхпроводящих магнитов. Одной из систем стенда является устройство для измерения потерь энергии в магнитах, работающих в циклическом режиме. Эти измерения позволяют проверить свойства сверхпроводящего кабеля, примененного для изготовления обмотки магнита.

Известно, что в композитных сверхпроводящих кабелях для магнитов ускорителей потери на переменном токе складываются из гистерезисных потерь в сверхпроводнике, потерь от вихревых токов в нормальном металле, потерь от собственного поля проводника и дополнительных потерь за счет неоднородности магнитного поля ^{3/}. Хорошее согласие между теоретическими и экспериментальными результатами для потерь в магнитах получается обычно только в некоторых специальных случаях. Расхождение может быть вызвано разными причинами, например, отсутствием точных данных по параметрам матрицы, пространственному распределению сверхпроводящих нитей, а также дефектами, возникающими при изготовлении и намотке кабеля /разрыв сверхпроводящих нитей, коротки и др./. Экспериментально эти потери можно измерить калориметрическим или электрическими методами. Недостатком первого метода является длительное время установления равновесных условий после импульсов тока. При измерении необходимо поместить магнит в калориметр, погруженный в жидкий гелий, что значительно затрудняет исследования магнитов больших

размеров. Электрические методы позволяют получить результат в течение одного цикла, причем измерение не зависит от теплопритоков в криостат из окружающей среды и по токовводам. Недостатком является необходимость определения константы между показаниями приборов и величиной потерь косвенным образом.

Ниже описана система для измерения потерь электрическим методом, применяемая в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Приведены результаты измерения потерь в обмотке импульсного диполя СПД-2/4/ электрическим методом, а также результаты измерения теплового потока к жидкому гелию, обусловленного циклической работой магнита, полученные по количеству испарившегося гелия.

Схема измерения

Схема измерения представлена на рис. 1.

Магнит/2/, находящийся в криостате/1/, запитывается импульсным источником тока 3. Источник имеет выходное напряжение 50 В и максимальную амплитуду тока 3000 А. Трапецеидальные импульсы тока /рис. 2/ формируются с помощью тиристорных ключей. Тепловой поток к жидкому гелию, обусловленный циклической работой $q_{ц}$, можно определить из уравнения:

$$q_{ц} = Q\rho\tau - q_0 \text{ Вт}, \quad /1/$$

где: Q - объемный расход гелия через счетчик в $\text{м}^3/\text{с}$; ρ - плотность гелия, проходящего через счетчик в $\text{кг}/\text{м}^3$; τ - теплота испарения жидкого гелия при температуре кипения, соответствующей давлению в криостате в $\text{Дж}/\text{кг}$; q_0 - суммарный тепловой поток к жидкому гелию из окружающей среды и по токовводам в Вт . Температура и абсолютное давление газа, проходящего через счетчик, регистрировались самописцами. Тепловой поток q_0 измерялся при постоянном токе, равном эффективному значению тока в цикле до и после измерения $q_{ц}$. Для измерения количества испарившегося гелия был использован газовый счетчик РГ-40-1.

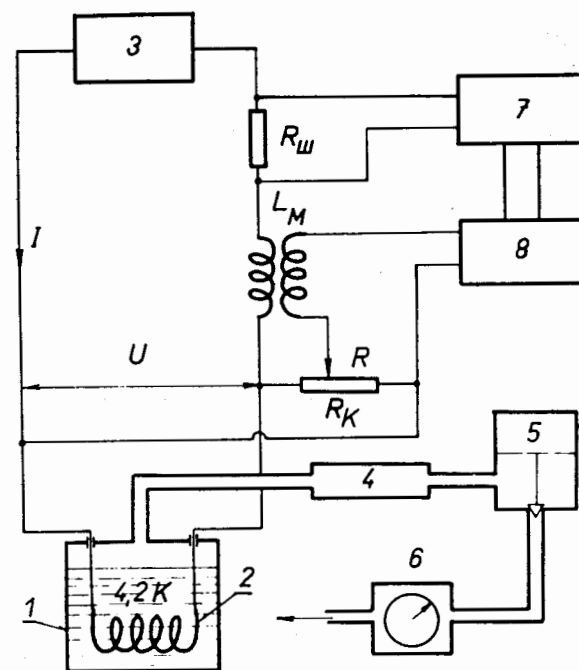


Рис. 1. Схема измерения. 1 - криостат, 2 - магнит, 3 - импульсный источник тока, 4 - теплообменник, 5 - регулятор давления, 6 - газовый счетчик, 7 - двухкоординатный самописец, 8 - интегратор.

Для измерения потерь в магните был использован электрический метод, предложенный Вильсоном /5/. Этот метод отличается простой схемой и наглядной формой записи результатов. На одну ось двухкоординатного самописца /7/ подается напряжение из интегратора /8/, который интегрирует напряжение в обмотке магнита в течение цикла. На другую ось самописца поступает напряжение с шунта $R_{ш}$, пропорциональное току в магните. Можно показать /5/, что если в начале и конце цикла ток равен нулю, то площадь петли, которую рисует перо двухкоординатного самописца, пропорциональна потерям. Энергия W_I , которая теряется за один цикл, равна:

$$W_I = -\tau \oint_0^T U(t) dt dl = kS \text{ Дж}, \quad /2/$$

где: $U(t)$ - напряжение в магните в течение цикла в В; $I(t)$ - ток в магните в течение цикла в А; T - время между началом и концом изменения тока /рис. 2/ в с; τ - постоянная времени интегратора в с; k - константа джоульметра в Дж/см²; S - площадь петли на двухкоординатном самописце, пропорциональная потерям.

Константу джоульметра можно определить как

$$k = \frac{\tau}{R_{III}} k_x k_y \text{ Дж/см}^2, \quad /3/$$

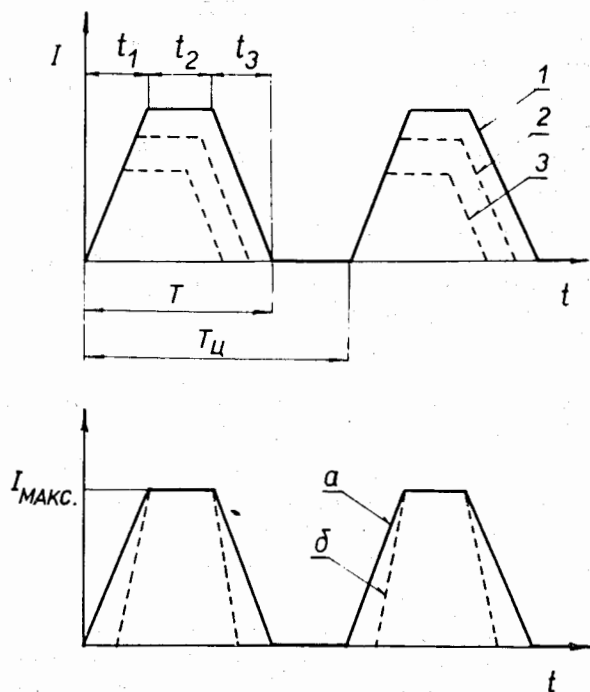


Рис. 2. Формы импульсов тока. 1,2,3 - формы импульсов с разной амплитудой и одинаковой скоростью нарастания и падения тока, а,б - формы импульсов с разной скоростью нарастания и падения тока и одинаковой амплитудой.

где: R_{III} - сопротивление шунта в Ом; k_x, k_y - чувствительности двухкоординатного самописца по осям x, y в В/см.

Для компенсации напряжения от реактивной составляющей, которое в магнитах обычно намного выше, чем напряжение, строго пропорциональное потерям, применялась линейная взаимоиנדуктивность L_M и потенциометр R_K /6/.

Градуировка схемы осуществлялась активным сопротивлением известной величины. В случае треугольного цикла с длительностью T секунд можно определить константу джоульметра как

$$k_{R_N} = \frac{1}{3} R_N I_{\text{макс}}^2 T \frac{R_K}{R} \frac{1}{S_N} \text{ Дж/см}^2, \quad /4/$$

где: k_{R_N} - константа джоульметра, определенная с помощью активного сопротивления R_N ; $I_{\text{макс}}$ - максимальная амплитуда тока в течение цикла в А; R_K - полное сопротивление потенциометра в Ом; R - сопротивление потенциометра после компенсации в Ом; S_N - площадь петли на самописце, пропорциональная потерям в сопротивлении R_N .

При градуировке джоульметра чувствительности на осях двухкоординатного самописца и сопротивление R были оставлены такими же, как и во время измерений на магните. Величина сопротивления R_N была подобрана так, чтобы площадь S_N примерно соответствовала площади S , пропорциональной потерям в магните.

В качестве интегратора был использован операционный усилитель с RC членом и схемой компенсации дрейфа. Постоянная времени интегратора τ была подобрана, исходя из анализа схемы с целью получения предельной чувствительности /7/. Для $\tau = 6,4 \cdot 10^{-3}$ с, $R_{III} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ Ом, $k_x = 10^{-3}$ В/см, $k_y = 10^{-1}$ В/см и $R_K/R = 1$ константа джоульметра, подсчитанная из уравнения /3/, равна $4,3 \cdot 10^{-3}$ Дж/см². Предельная чувствительность в реальном случае зависит, в основном, от

дрейфа интегратора и от того, насколько близко соотношение R_K/R к единице. При $R_K/R = 1$ предельная чувствительность описанной схемы составляла около $5 \cdot 10^{-3}$ Дж.

Результаты измерений

В качестве исследуемого объекта был использован сверхпроводящий диполь СПД-2^{4/}. Приведенные ниже результаты испытаний были получены после отключения трех внутренних слоев. В "теплой" апертуре диаметром 5 см горизонтального криостата этот диполь создавал поле 4,1 Т при токе 360 А. Магнит длиной 0,7 м, с наружным диаметром обмотки 0,22 м, с числом слоев обмотки 31, намотан из 19-жильного кабеля. Кабель скручен из 10 сверхпроводящих жил диаметром 0,25 мм

Таблица 1

Результаты измерений q_{II} и W_1/T_{II} для диполя СПД-2

$I_{МАКС.}$ [А]	t_1 [с]	t_2 [с]	t_3 [с]	T_{II} [с]	q_{II} [Вт]	W_1/T_{II} [Вт]
244	7	7	7	35	11,5	12
244	7	7	7	65	7,5	6,5
272	7	7	7	35	13	13,2
240	7	7	7	29	17	14,5
224	5	1	7	20	19,4	20,5
300	6,5	8	15,5	34,5	15	17
250	6,5	8	8	25,5	15,3	17,4
250	27	8	8	48	9	9

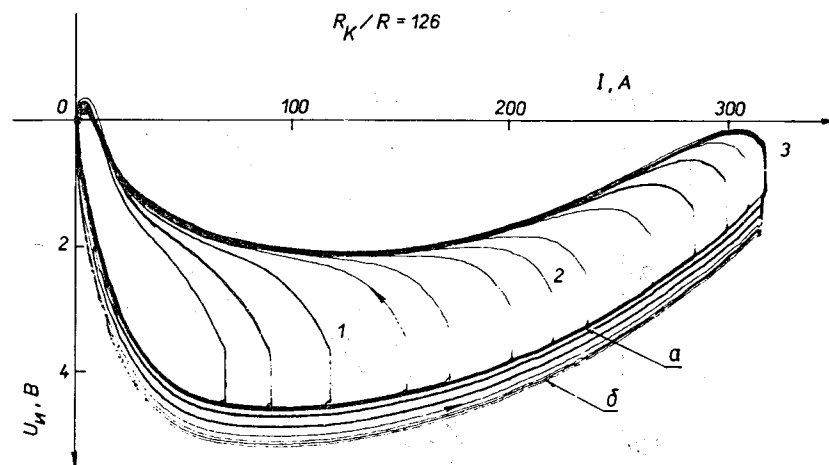


Рис. 3. Записи гистерезисных кривых на самописце. Обозначения 1,2,3 и а,б соответствуют рис. 3. Для кривой а и амплитуды 3 $t_1 = 46$ с, $t_2 = 1$ с, $t_3 = 7,5$ с /см. рис. 2/. Для кривой б и амплитуды 3 $t_1 = t_3 = 7,5$ с и $t_2 = 1$ с.

из сплава 65БТ и 9 медных жил и пропаян индием. Шаг скрутки кабеля - 2,5 см. Наружный диаметр кабеля без изоляции равен 1,6 мм.

Результаты измерений теплового потока к жидкому гелию для разных параметров циклов приведены в табл. 1. Суммарный тепловой поток к жидкому гелию из окружающей среды и по тоководам - q_0 при постоянном токе 300 А составлял $2 \pm 2,5$ Вт. Разница между величиной q_0 , измеренной с током 300 А и без тока, была 0,3 Вт.

На рис. 3 приведены записи гистерезисных кривых на двухкоординатном самописце, полученные электрическим методом. Зависимости потерь энергии на один цикл от амплитуды магнитного поля в центре диполя СПД-2, для разных скоростей изменения поля, приведены на рис. 4.

На рис. 5 приведены зависимости потерь на один цикл от скорости изменения магнитного поля в СПД-2 для

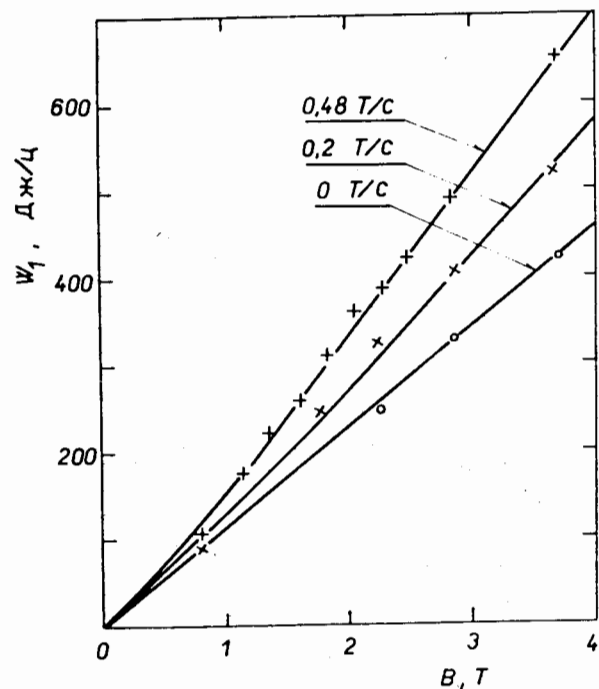


Рис. 4. Зависимости потерь энергии на один цикл от магнитного поля в центре импульсного диполя СПД-2. Скорости нарастания и падения поля для кривых 0,2 Т/с и 0,48 Т/с были одинаковые.

разных амплитуд тока. Из этого рисунка можно определить вклад потерь от вихревых токов в медных жилах кабеля в общие потери. Скорость изменения магнитного поля \dot{B} , при которой потери в нормальном металле равны гистерезисным потерям в сверхпроводнике ^{/8/}, равна 0,95 Т/с для тока 320 А.

В табл. 1, кроме величин $q_{ц}$, измеренных по количеству испарившегося гелия, приведены также величины $W_1 / T_{ц}$, полученные электрическим способом. В пределах точности измерения $q_{ц}$ значения величин $W_1 / T_{ц}$ и $q_{ц}$ совпадают. Из этого можно сделать вывод, что разница введенной и выведенной из магнита за цикл энергии диссипируется практически полностью в жидкий гелий.

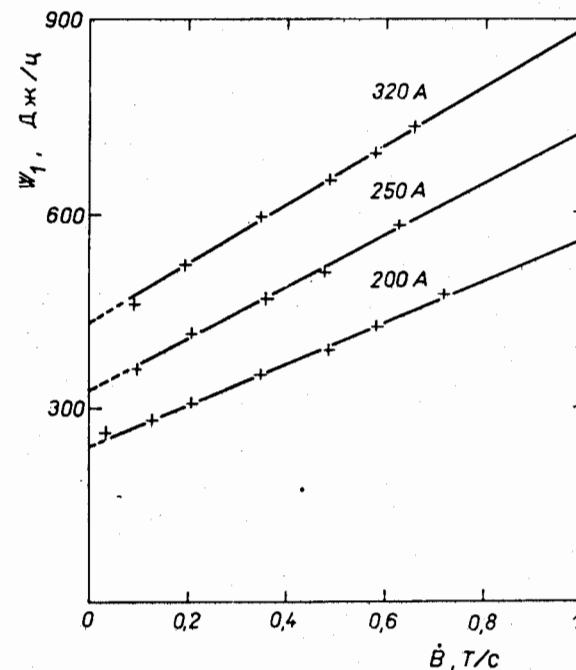


Рис. 5. Зависимости потерь энергии на один цикл от скорости изменения магнитного поля в импульсном диполе СПД-2 для разных амплитуд тока, $t_1 = t_3$.

Авторы благодарны И.Гласнику и Ф.Штофанику, сотрудникам Электротехнического института САН, Братислава, за полезные советы и помощь при создании аппаратуры, а также сотрудникам криогенного отдела ОИЯИ, принимавшим участие в этой работе.

Литература

1. В.П.Алексеев и др. ОИЯИ, 9-7148, Дубна, 1973.
2. А.М.Балдин и др. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 18-20 ноября 1974 г., М., Наука, 1975, т. II, с. 4.

3. H. Brechna. Superconducting Magnet Systems, Springer-Verlag, Berlin, 1973.
4. В.П.Алексеев и др. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 2-4 октября 1972 г., М., Наука, 1973, т. I, с. 163.
5. M.N.Wilson. Cryogenics, 13, 361, 1973.
6. I.Hlasnik, C.Lefrancois, J.P.Pouillange. CEN Saclay, Sedap/69-308, 1969.
7. I.Hlasnik, F.Stofanik, F.Chovanec. Elektrotechnicky ustac SAV Bratislava, P03-561-066/3.1.2-4, 1974.
8. W.Gilbert, F.Voelker, R.Acker, J.Kaugerts. LBL, 571, California, 1972.

*Рукопись поступила в издательский отдел
30 июня 1976 года.*