

8302

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



8302

Экз. инт. зала

8 - 8302

И.Н.Гончаров, А.Никитиу, И.С.Хухарева

К РАСЧЕТУ ПОТЕРЬ
И ВЫБОРУ ТИПА ПРОВОДНИКА
ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТОВ
НУКЛОТРОНА

1974

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

И.Н.Гончаров, А.Никитиу,* И.С.Хухарева

К РАСЧЕТУ ПОТЕРЬ
И ВЫБОРУ ТИПА ПРОВОДНИКА
ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТОВ
НУКЛОТРОНА

**Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ**

* Институт атомной физики, Бухарест.

При разработке проекта ускорителя релятивистских ядер - нуклотрона /1/ одной из важнейших задач является выбор типа проводника для импульсных дипольных магнитов, т.к. он в значительной мере определяет стоимость всего ускорителя. В частности, требуется заранее определить, необходимо ли для снижения потерь введение в проводник мельхиоровых перегородок той или иной конфигурации, что существенно усложняет технологию и повышает стоимость проводника.

Потери мощности в сверхпроводящей обмотке импульсного магнита в основном складываются из гистерезисных потерь и потерь за счет вихревых токов /токов Фуко/. Мы рассчитали те и другие потери для случая проводника с медной матрицей, не имеющей мельхиоровых перегородок, сравнили их между собой и оценили потери на метр длины импульсного дипольного магнита нуклотрона .

Исходные данные

Максимальная индукция в диполе	- $B_{\text{макс}} = 5 \text{ Т}$
Скорость изменения индукции в апертуре	- $\dot{B} = 1 \text{ Т/сек}$
Время нарастания и спада индукции	- по 5 сек /изменение по линейному закону/.

Сверхпроводящий провод /кабель/ состоит из M проволок, каждая из которых /см. рис. 1 и табл. 1/ содержит N сверхпроводящих нитей /СПН/ из НТ-50 с диаметром $d = 10 \text{ мкм}$, размещенных в медной матрице.

Гончаров И.Н., Никитиу А., Хухарева И.С.

8 - 8302

К расчету потерь и выбору типа проводника для сверхпроводящих импульсных магнитов нуклотрона

Сделана оценка потерь мощности в сверхпроводящем проводнике для импульсных магнитов нуклотрона. Проведено сравнение относительного вклада гистерезисных потерь и потерь на токи Фуко.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований
Дубна, 1974

Шаг скрутки проволоки $-\ell_p$, критическая плотность тока в сверхпроводнике $J_c = 1,05 \cdot 10^5 \text{ А/см}^2$ при $B=5 \text{ Т}$.

Потери на вихревые токи на 1 м проволоки за 1 сек рассчитываются по формуле /2,3/

$$\frac{P_e}{L_{пр}} = A \left(\frac{1}{\rho''_{эфф}} + \frac{C}{\bar{R}} \cdot \frac{1}{\rho'_{Cu}} \right) \quad / \text{Вт/м/}, \quad /1/$$

где

$$A = \frac{\pi}{4} (2R_i)^2 \frac{(\bar{B} \ell_p)^2}{12 \cdot 4} = 1,65 \cdot 10^{-6} R_i^2, \quad /2/$$

$R_i = R_e - C$, $\bar{R} = R_e - \frac{C}{2}$ /см. рис. 1/, ρ_{Cu} - удельное сопротивление матрицы.

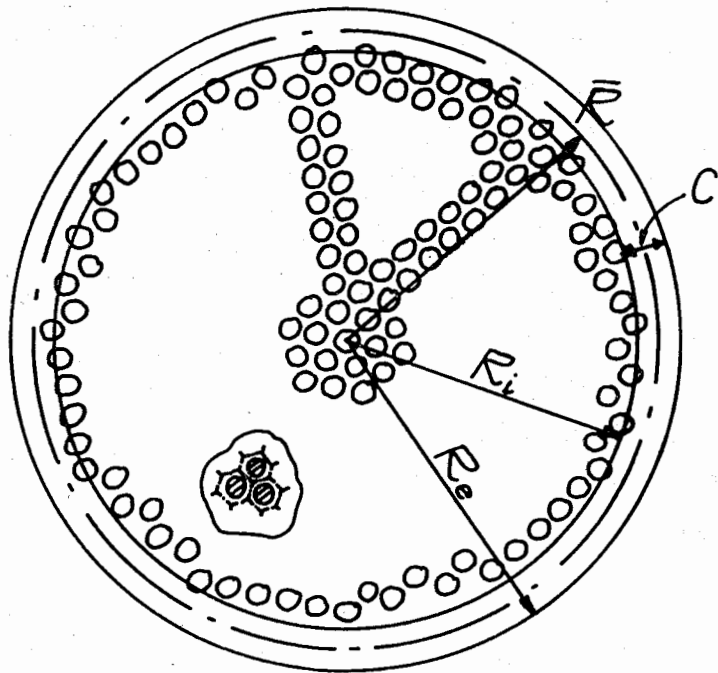


Рис. 1. Схематический разрез проволоки со сверхпроводящими нитями в матрице из нормального металла.

$$\rho''_{эфф} = \rho'_{эфф} \left(\frac{w}{w-d} \right)^{-1} \quad /3/$$

где $\rho'_{эфф}$ - эффективное удельное сопротивление матрицы с учетом повышенного сопротивления переходного слоя между сверхпроводящими нитями и матрицей, w - расстояние между центрами СПН, которое определяется из исходных данных следующим образом /при предположении, что СПН распределены равномерно внутри круга диаметром $2R_i$ /.

Как видно из рис. 2, площадь шестиугольника

$$S_f = \frac{6}{\sqrt{3}} \left(\frac{w}{2} \right)^2.$$

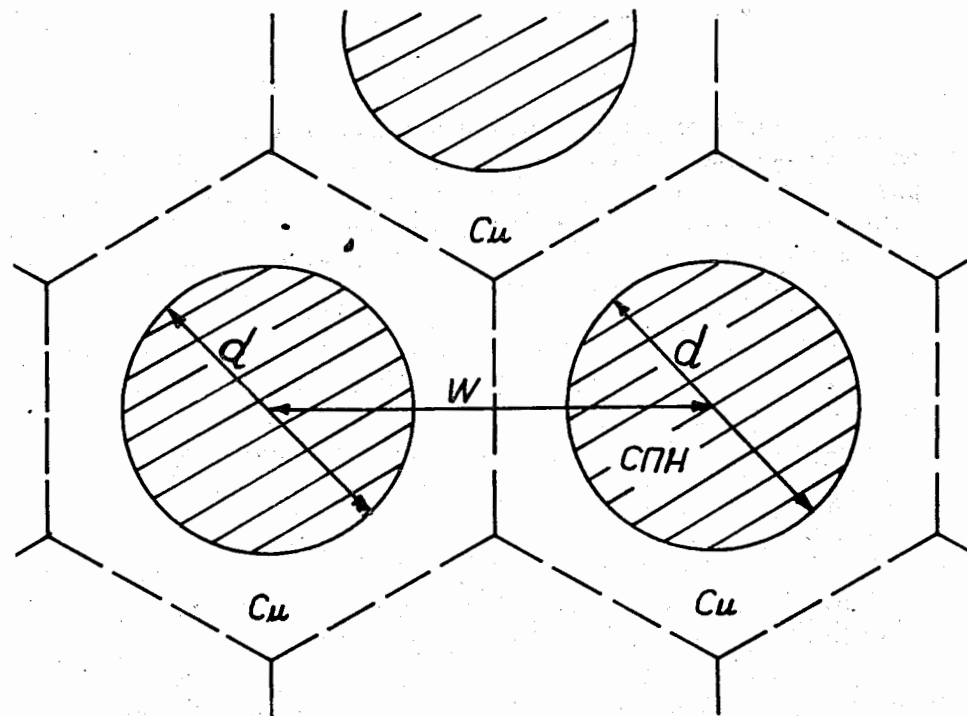


Рис. 2. Часть поперечного сечения проволоки.

Площадь сечения проволоки /без медного чехла, не содержащего СПН/

$$S_{\text{пр}}^i = N \cdot S_f = \pi (R_i)^2$$

N = - число СПН в проволоке.

Отсюда

$$S = \frac{6}{\sqrt{3}} \left(\frac{w}{2}\right)^2 = \frac{\pi (R_i)^2}{N}$$

и

$$w = \sqrt{\frac{2\pi}{\sqrt{3} N}} R_i.$$

/4/

$\rho'_{\text{эфф}}$ определяется экспериментально и поэтому для рассматриваемых нами проводов точно неизвестно. Из работ /3,4/, где $\rho'_{\text{эфф}}$ вычислялось из измерений потерь в многожильных ниобий-титановых проводах с медной матрицей, следует, что эта величина лежит в пределах /5-15/ $\cdot 10^{-10}$ Ом.м. При этом $\rho'_{\text{эфф}}$ имеет тенденцию возрастать с увеличением коэффициента заполнения λ /т.е. отношения поперечного сечения сверхпроводника к сечению провода/ от 0,25 до 0,9. В своих расчетах мы приняли $\rho'_{\text{эфф}} = 7 \cdot 10^{-10}$ Ом.м, т.е. величину, близкую к нижней границе. Тем самым мы определили верхний предел для потерь за счет вихревых токов. При $c/\bar{R} \leq 0,1$ второй член в формуле /1/ дает вклад в эти потери $\leq 10\%$.

Отметим между прочим, что в формуле /4.1.51/ работы /2/ для величины ρ'' содержится опечатка: множитель в скобках не возведен в степень /-1/. Мы признательны И.Гласнику, указавшему на эту ошибку.

Гистерезисные потери на 1 м проволоки за цикл рассчитываются по формуле /2/:

ТАБЛИЦА I
ХАРАКТЕРИСТИКА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ПРОВОЛОК

ТИП ПРОВОЛОКИ	a	b	c
ШАР СКРУТКИ [10^{-3} м]	5	5	3
2R ₀ ДИАМЕТР ПРОВОЛОКИ [10^{-3} м]	0,916	0,500	
СРЕДНЯЯ ТОЛЩИНА МЕДНОГО ЧЕХЛА [10^{-6} м]	50	35	
ЧИСЛО N СПН	3355	1045	
ДИАМЕТР P СПН [10^{-6} м]	10	10	
РАСТОЯНИЕ МЕЖДУ ЦЕНТРАМИ СПН W [10^{-6} м]	13,5	12,9	
КОЭФФ. ЗАПОЛНЕНИЯ λ	0,40	0,42	
КРИТИЧЕСКАЯ ДЛИНА L _{c3} [10^{-3} м]	2,2	2,2	
КРИТИЧЕСКИЙ ТОК ПРИ 5T I _{c1st} [A]	276	86	

$$\frac{W_{h\ell}}{L_{np}} = \frac{I_0 B_0}{2} \cdot d \cdot \ln \left(\frac{B_{\text{макс}} + B_0}{B_{\text{мин}} + B_0} \right) / \text{Дж/цикл.м./} \quad /5/$$

$I_0 B_0$ - характеризует критический ток в сверхпроводнике, зависимость которого от индукции достаточно хорошо аппроксимируется формулой Кима^{/5/}:

$$I_c(B) = \frac{I_0 B_0}{B + B_0} \quad /6/$$

где $I_0(T) = 2I_c$ (при $B = B_0$) и $B_0(T)$ - постоянные, зависящие от температуры. Из экспериментальной зависимости $J_c^{-1} = f(B)$ для НТ-50 при 4,2°К получается $B_0 = 2,2$ Т при $B = 1 \div 3$ Т и $B_0 = 1$ Т при $B \approx 5$ Т. Разница в $I_0 B_0$ для $B_0 = 1$ Т и 2,2 Т не превышает 5%, поэтому в дальнейшем принято $B_0 = 1$ Т, $I_0 = 1660$ А для проволоки с 3355 СПН и $I_0 = 516$ А для проволоки с 1045 СПН.

Результаты расчета потерь на 1 м проволоки приведены в табл. 2.

Из таблицы видно, что потери за счет токов Фуко в проволоке "с" значительно меньше, чем в "б". Это связано с уменьшением шага скрутки. Следует учесть также, что желательно выполнение условия $l_p \leq l_c$, т.к. при $l_p \sim 4l_c$ СПН может переходить в резистивное состояние из-за больших наведенных токов, вследствие чего возникнут значительные добавочные потери при протекании по проволоке рабочего тока магнита.

В правом столбце таблицы дается приведенная энергия

$\frac{W}{L_{np} I_c(5 T)}$, позволяющая сравнивать потери в различных материалах.

На основании полученных данных сделаны оценки потерь в обмотках сверхпроводящих дипольных магнитов нуклотрона для двух случаев:

1. Когда во всех частях обмотки магнита индукция меняется от 0 до $B_{\text{макс}} 5$ Т.

ТАБЛИЦА 2
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ НА 1м ПРОВОЛОКИ

ТИП ПРОВОЛОКИ	с			б			д		
	МОЩНОСТЬ	ЭНЕРГИЯ	ПРИБ. ЭНЕРГИЯ	МОЩНОСТЬ	ЭНЕРГИЯ	ПРИБ. ЭНЕРГИЯ	МОЩНОСТЬ	ЭНЕРГИЯ	ПРИБ. ЭНЕРГИЯ
ВИД ПОТЕРЬ	$\frac{P}{L_{np}} \left[\frac{10^{-3} \text{ Вт}}{\text{м}} \right]$	$\frac{W}{L_{np}} \left[\frac{10^{-3} \text{ Дж}}{\text{м.А.Ц}} \right]$	$\frac{W}{L_{np}} \left[\frac{10^{-3} \text{ Дж}}{\text{м.А.Ц}} \right]$	$\frac{P}{L_{np}} \left[\frac{10^{-3} \text{ Вт}}{\text{м}} \right]$	$\frac{W}{L_{np}} \left[\frac{10^{-3} \text{ Дж}}{\text{м.ЦИКА}} \right]$	$\frac{W}{L_{np}} \left[\frac{10^{-3} \text{ Дж}}{\text{м.А.Ц}} \right]$	$\frac{P}{L_{np}} \left[\frac{10^{-3} \text{ Вт}}{\text{м}} \right]$	$\frac{W}{L_{np}} \left[\frac{10^{-3} \text{ Дж}}{\text{м.А.Ц}} \right]$	$\frac{W}{L_{np}} \left[\frac{10^{-3} \text{ Дж}}{\text{м.А.Ц}} \right]$
ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ПОТЕРИ	1,49	14,9	54,0	0,462	4,62	54,0	0,462	4,62	54,0
ПОТЕРИ ЗА СЧЕТ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ	1,66	16,6	61,5	0,556	5,56	66,0	0,199	1,99	23,2
СУММАРНЫЕ ПОТЕРИ	3,15	31,5	115,5	1,018	10,18	120,0	0,661	6,61	77,2

2. Когда в 1/3 части обмотки индукция меняется от 0 до 5T, в 1/3 части - от 0 до 3T и в 1/3 части - от 0 до 1T. Этот случай более близок к реальному, чем 1. Для точного расчета потерь надо знать $B(x, y, z)$ во всей обмотке и провести аккуратное интегрирование. Результаты представлены в табл. 3.

При расчете принято, что верхняя и нижняя половины диполя имеют по 130 витков провода, состоящего из M проволок с указанными выше параметрами; цикл = 10 сек; $B_{\text{макс}} = 5T$; поперечное сечение проводника в плоскости, перпендикулярной длине магнита, равно $\sim 31,5 \times 10^{-4} \text{ м}^2$. Результаты оценки неплохо согласуются /после соответствующего пересчета/ с экспериментально измеренными потерями в различных кабелях и дипольных магнитах /6-11/.

Выводы

Проведенные расчеты позволяют сделать следующие выводы:

1. Потери за счет вихревых токов Фуко в обмотке импульсного дипольного магнита нуклотрона при использовании проводника с медной матрицей, не содержащей мельхиора, и диаметре нитей из ниобий-титанового сплава 10 мкм не превышают гистерезисных потерь.

2. Существенного уменьшения потерь за счет вихревых токов в кабеле без мельхиоровых перегородок можно достичь /при том же $B_{\text{макс}}$ и длительности цикла/ путем уменьшения шага скрутки от 5 до 3 мм, что по видимому, повлечет за собой уменьшение диаметра проволоки от 1 до 0,5-0,6 мм.

3. Вклад в эти потери за счет медного чехла, не содержащего СПН, оказывается порядка отношения его толщины к радиусу проволоки.

В заключение авторы выражают признательность А.Г.Зельдовичу и Л.Г.Макарову за постановку задачи и обсуждения.

ТАБЛИЦА 3
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ НА 1 м МАГНИТА

ЧИСЛО ПРОВОЛОК ТИП ПРОВОЛОКИ	M = 11		M = 35		
	α.		β		С
	МОЩНОСТЬ P/L _m [Вт/м]	ЭНЕРГИЯ W/L _m [Джс/м-цикл]	МОЩНОСТЬ P/L _m [Вт/м]	ЭНЕРГИЯ W/L _m [Джс/м-цикл]	
ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ПОТЕРИ	8,52	85,2	8,40	84,0	84,0
ПОТЕРИ ЗА СЧЁТ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ	9,50	95,0	10,10	101,0	36,2
СУММАРНЫЕ ПОТЕРИ	18,02	180,2	18,50	185,0	120,2
ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ПОТЕРИ	5,68	56,8	5,60	56,0	56,0
ПОТЕРИ ЗА СЧЁТ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ	3,16	31,6	3,36	33,6	12,1
СУММАРНЫЕ ПОТЕРИ	8,84	88,4	8,96	89,6	68,1

Литература

1. В.П.Алексеев, А. М.Балдин, Ю.Д.Безногих и др. Перспективы исследований по релятивистской ядерной физике в ЛВЭ ОИЯИ /Соображения по развитию ускорительного комплекса/. Сообщения ОИЯИ, 9-7148, Дубна, 1973.
2. H.Brechna. *Superconducting Magnet Systems*, Springer-Verlag, Berlin, 1973.
3. A.H.Spurway, J.D.Smith, M.N.Wilson. *J.Phys.D. Appl.Phys.*, 3, 1517 (1970).
4. P.R.Critchlow, B.Zeitlin. *J.Appl.Phys.*, 41, 4860 (1970).
5. Y.B.Kim, C.F.Hempsted and A.R.Strnad. *Phys.Rev.*, 131, 6, 2486 (1960).
6. G.Ries, K.P.Jungst. Preprint IEKP, KFK, 1354, 1971.
7. W.Heinz. Preprint IEKP, KFK 3/72-5, 1972.
8. G.Ries, H.Brechna. Preprint IEKP, KFK, 1372, 1972.
9. G.Bronca et al. Report on the 4th Int. Conf. on Magnet Technology, Brookhaven, Sept. 1972.
10. Towards a European Superconducting Synchrotron. Report GESSS, 1 (1972); Report GESSS, 2 (1973).
11. A.D.McInturff et al. Brookhaven National Lab., Accel. Dept. Internal Report - AADD-179, CRISP 71-13, 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 октября 1974 года.