4995/2-76

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА

13/XII-76

8 - 10004

Д.Кабат, Л.Цеснак

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАТУШЕК ГЕЛЬМГОЛЬЦА С УЧЕТОМ j_c-B ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХПРОВОДНИКА

1976

8 - 10004

Д.Кабат,* Л.Цеснак *

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАТУШЕК ГЕЛЬМГОЛЬЦА С УЧЕТОМ j_c-B ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХПРОВОДНИКА

Направлено в ПТЭ

* Электротехнический институт Словацкой академии наук, Братислава, ЧССР.

I. ВВЕДЕНИЕ

Две сверхпроводящие катушки, расположенные соосно на некотором расстоянии $2\,b_c$ (см.рис.I) друг от друга (катушки Гельмгольца), используются в качестве источника однородного магнитного поля во многих физических экспериментах. Для уменьшения расхода сверхпроводника размеры катушек оптимизируют, причем обычно предполагают равномерное распределение плотности тока по обмоткам. Например, такая оптимизация проведена Деем /I/. В этой работе для заданной величины $2\,b_c$ выполнено условие однородности поля 4-й степени по М.Гарретту /2/, однако не учтено то обстоятельство, что максимальная индукция магнитного поля B^{max} на внутренней поверхности обмотки существенно выше (на 10-60%) индукции B_0 в центре катушек. Таким образом, не учтено влияние B^{max} на критический ток катушек.

Цель настоящей работы - создание такой методики оптимизации размеров сверхпроводящих катушек Гельмгольца, которая учитывает неравенство $B^{max} > B_0$ и реальный вид характеристики j_c-B сверхпроводника, идущего на изготовление обмоток. Для сверхпроводящих цилиндрических соленоидов подобная методика разработана Атертоном /3/.

Поставленная нами задача может быть решена только в связи с определенной токовой характеристикой сверхпроводника. При испытании изготовленных в Электротехническом институте САН лабораторных соленоидов получена j_c-B характеристика проводников из ниобий-титана, которая в области $4T < B < 8T$ приближенно описывается уравнением:

$$j_c = \left[3{,}5 - 0{,}6\,(B - 5)\right] \cdot 10^8 \qquad \left[A/м^2,\ T\right]. \qquad (I)$$

Соленоиды не имели деградации, при дальнейших расчетах и рассуждениях деградации катушек также не предполагается.

Для определения места и величины B^{max} в обмотках с различной геометрией используем численный метод.

Снабдим индексом G (геометрическая) обозначения, используемые при расчетах по методике Дея, а индексом A (абсолютная) обозначения в разрабатываемой нами методике.

Предполагая линейность токовой характеристики сверхпроводника, можно показать, что отношение индукций в центрах оптимизированных обоими методами катушек имеет вид:

$$\frac{B_{oA}}{B_{oG}} = \frac{(B_o/I)_A}{(B_o/I)_G} \cdot \frac{1 + mK_G (B_o/I)_G}{1 + mK_A (B_o/I)_A}, \qquad (2)$$

где $m = |\partial I_c / \partial B|_{B_x}$, $K = B^{max}/B_o$ и B_o/I – характеристики пары катушек. Оптимальное решение по Дею определяет геометрию, которая для данного объема обмотки V обеспечивает максимальное значение величины B_o/I. Любое изменение этой геометрии уменьшает величину B_o/I, поэтому $(B_o/I)_A/(B_o/I)_G$ будет $<$ I. Однако не исключено и в этом случае, что значение B_o повысится за счет уменьшения коэффициента K. Соотношение $[1 + mK_G(B_o/I)_G]/[1 + mK_A(B_o/I)_A]$ будет $>$ I, если $K_A \leq K_G$. Таким образом, в соответствии с уравнением (2), для некоторых соотношений размеров катушек, оптимизированных "абсолютным" образом, можно ожидать повышения B_{oA}. Представляется интересным вычисление этих размеров и величины B_o с учетом реальной I_c -B характеристики сверхпроводника.

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Поскольку аналитическое решение задачи невозможно, нами создана расчетная программа для ЭВМ, построенная следующим образом. Задаемся величинами $2b_c$, длиной провода ℓ, приходящимся на один

виток сечением обмотки A_{ef}, $V = \ell \cdot A_{ef}$, характеристикой сверхпроводника по уравнению (I) и множеством значений внутреннего радиуса a_1 обмотки. Из условия однородности поля 4-й степени по Гарретту /2/ определяем множество значений размеров a_2, b (см. рис.I). Из этого множества решений выбирается такое, которое даст максимум величины B_{oc}.

Оптимизацию размеров при заданных величинах $2b_c$, A_{ef}, определенной токовой характеристики сверхпроводника и однородности поля можно провести двумя эквивалентными способами:

а) При заданной величине B_{oc} находится минимальный объем обмотки V.

б) При заданной величине V находится максимальное значение B_{oc}.

Для нахождения величины B^{max} использована методика суммирования магнитных полей, создаваемых фиктивными витками, на которые делится реальная обмотка /4/.

По результатам проведенных нами расчетов построена диаграмма (рис.2) для определения оптимальной формы катушек Гельмгольца. При использовании диаграммы следует иметь в виду, что она пригодна для проводников,удовлетворяющих уравнению (I).Порядок работы с диаграммой следующий.По заданной величине V/b_c^3 определяются относительный размер $\alpha = a_2/a_1$ и соответствующие этому $\beta = b/a_1$, $\beta_c = b_c/a_1$, B^{max}/B_o, $B_o A_{ef}/(I b_c)$.
Для заданных значений A_{ef} и b_c из комплекса $B_o A_{ef}/(I b_c)$ находится характеристика B_o/I. На отдельном графике с координатами I_c и B строятся характеристики сверхпроводника и катушек

($B^{max}/I = кB_0/I$). Критический ток катушек $I_{см}$ определяется точкой пересечения этих характеристик. Индукция в центре при $I_{см}$ $B_{ос} = (B_0/I)I_{см}$.

Сравнение "геометрического" и "абсолютного" оптимальных решений позволяет сделать следующие выводы. При одинаковых величинах V/b_c^3 "абсолютно" оптимизированные катушки ниже (до ~ 20%), толще (до ~ 16%) и имеют меньший внутренний радиус a_1, чем "геометрически" оптимизированные катушки. Разница этих размеров увеличивается при уменьшении величины V/b_c^3. С ростом коэффициента "К" увеличивается выигрыш в объеме V (до ~ 6%) или величине $B_{ос}$ (до 1÷2%) при использовании "абсолютной" оптимизации.

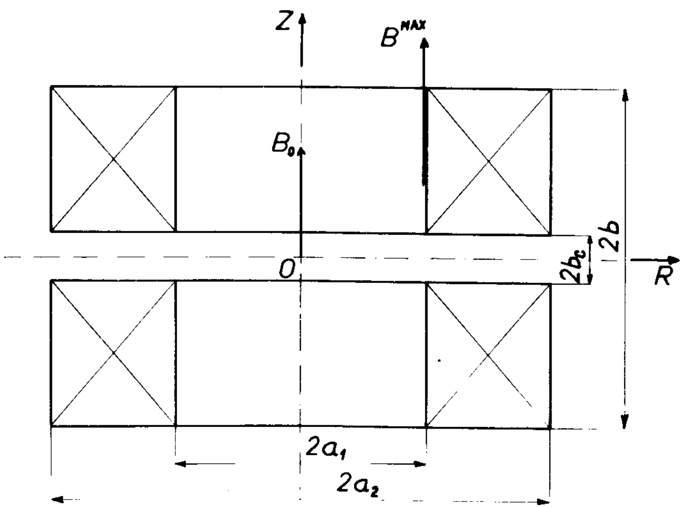

Рис. 1. Форма обмотки катушек Гельмгольца.

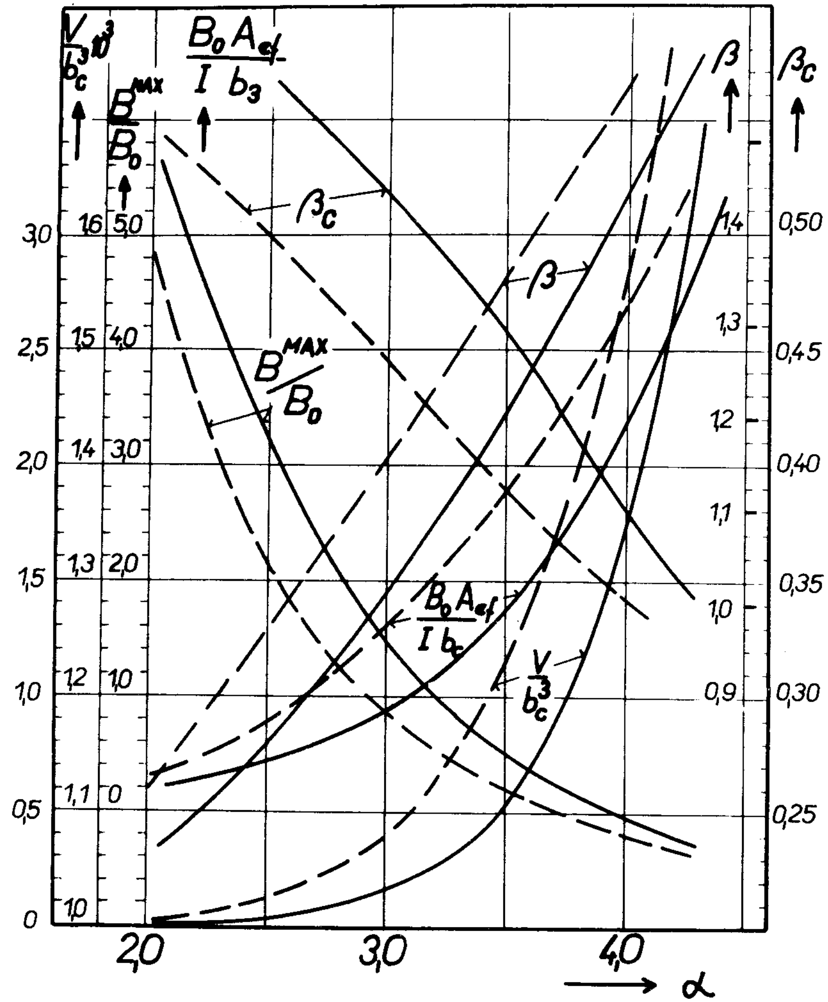

Рис. 2. Диаграмма для определения оптимальной формы обмотки катушек Гельмгольца.
Сплошные линии – оптимизация "абсолютная", пунктирные – "геометрическая".

ЛИТЕРАТУРА

1. J.D.A.Day. Journ.Scient.Instr., 1963, 40, 583.
2. M.W.Garrett. Journ.Appl.Phys., 1951, 22, 9, 1091.
3. D.Atherton. Journ.Appl.Phys., 1969, 40, 5, 2246.
4. L. Cesnak, D.Kabat. Elektrotechnicky obzor, 1970, 59, 7, 338.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 августа 1976 года