

Айрян Э. А. и др.
Б1-11-86-193

е+

С34504
3243/86



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б 1-11-86-193

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1986

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Лаборатория вычислительной техники и автоматизации

51-11-86-193

Э.А. Айрян, И.А. Гаганов, Е.П. Мидков, И.Б. Иссинский, В.А. Михайлов,
Р.В. Полякова, Б.Н. Хоромский

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ДИПОЛЕЙ И КВАДРУПОЛЕЙ
НУКЛОТРОНА

Депонированное сообщение

Бумага для копирования
с использованием лазера
01 04 86

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

Аннотация

В настоящей работе рассмотрена возможность последовательного питания токовых обмоток структурных магнитных элементов Нуклотрона /1/ - ускорителя релятивистских ядер на энергию в 6 ГэВ/нуклон, проектируемого в ЛВЭ ОИЯИ. На основе численных расчетов при помощи программы *GRIDS* для выбранных элементов магнитной структуры установлен диапазон изменения токов в обмотках, для которого необходима система коррекции. Показано, что в рассмотренных дипольных и квадрупольных системах возможно создание на расстояниях $r = 2$ см от центра элементов дипольных и квадрупольных полей близких к идеальному.

В настоящей работе рассмотрена возможность последовательного тания токовых обмоток структурных магнитных элементов Нуклотрона ускорителя релятивистских ядер на энергию в 6 ГэВ/нуклон, проектируемого в ЛВЭ ОИЯИ. Для использования последовательного соединения сверхпроводящих (СП) обмоток дипольных магнитов и квадрупольных линз необходимо чтобы в диапазоне токов $I = I \pm 7$ кА отношение $K(I) = G(I) \ell_L / B_M(I) \ell_M$ было постоянным, где $G = \frac{dB_{L,x}}{dx} /_{x,y=0} = \frac{dB_{L,y}}{dy} /_{x,y=0}$ - градиент магнитного поля в линзе, $B_M = (B_x, B_y)$ - магнитное поле диполя, ℓ_L и ℓ_M - эффективные длины линзы и магнита, определяемые из соотношений:

$$\int_{-\infty}^{\infty} G(z) dz = G \cdot \ell_L, \quad \int_{-\infty}^{\infty} B(z) dz = B_M \ell_M \quad (I.1)$$

Если $K(I) \neq const$, то имеется некоторый сдвиг частот бетатронных колебаний частиц в ускоряющем пучке, который может привести к возбуждению резонансов бетатронных колебаний. Для того, чтобы этот сдвиг укладывался в естественный интервал частот бетатронных колебаний $\Delta Q \sim 0,01$, связанный с разбросом импульсом и амплитуд ускоряемых частиц, на величину $\Delta G/G$ накладывается ограничение.

$$\frac{\Delta G}{G} \sim 10^{-3} \quad \text{в центре линзы.}$$

Таким образом возникает задача подбора оптимальных конфигураций магнитов и линз, для которых выполняется условие во всем интервале изменения тока I :

$$\left(\frac{\Delta K}{K} \right)_{\max} \leq 10^{-3} \quad (I.2)$$

В двумерном случае компоненты магнитного поля B внутри апертуры представляются через полярные координаты r, θ в виде разложения по гармоникам

$$B_y(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n r^n \cos n\theta$$

$$B_x(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n r^n \sin n\theta$$

Здесь $B \equiv b_1, G \equiv b_2$

I. Результаты численных расчетов

Расчеты полей в СП квадрупольях и диполях проводились двумя м

ДАНЕ:

1. Конечно-разностным (система программ *POISSON/3/*);
2. Многосеточным разностным методом (программа *GRIDS/4/*).

В качестве элементов магнитной структуры были выбраны СП магниты с прямоугольной апертурой и железным ярмом и явнополюсные СП линзы, конфигурации поперечных сечений которых приведены на рис. 1. Железные экраны рассматриваемых элементов состоят из стали $Fe + 3,25\%$. На рис. 2 для этого материала приведена зависимость магнитной проницаемости μ , от величины магнитной индукции B для $T = 4,2 \text{ К}$ /5/.

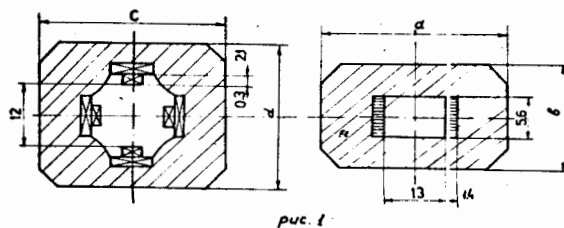


Рис. 1. Конфигурации СП дипольных магнитов и квадрупольных линз. Число витков в обмотках магнита $N_M = 16$, линзы $N_L = 12$. Размеры зоны в (см).

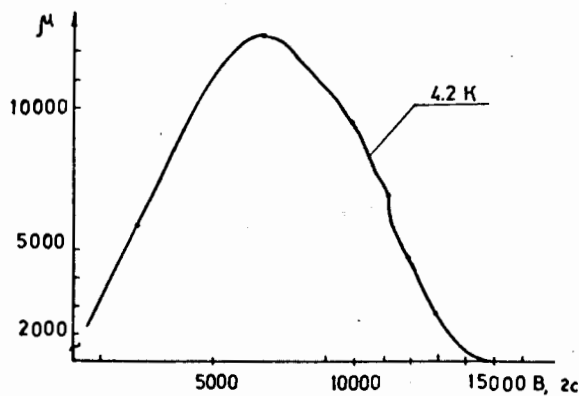


рис. 2.

Рис. 2.

Требованию получения максимальной энергии 6 ГэВ/нуклон отвечают магниты с индукцией $(B_M)_{\text{max.}} = 2 \text{ Тл}$,

С помощью *GRIDS* был проведен комплекс расчетов дипольных и квадрупольных СП магнитных систем. Рассматривались магниты и линзы с разными внешними размерами железного ярма (см. рис. 1). Размеры ярма ($a \times b$) выбирались с учетом условия (1.2). На рис. 3 представлены различные зависимости индукции магнитного поля B от тока в обмотке в центре магнита при различных значениях ($a \times b$).

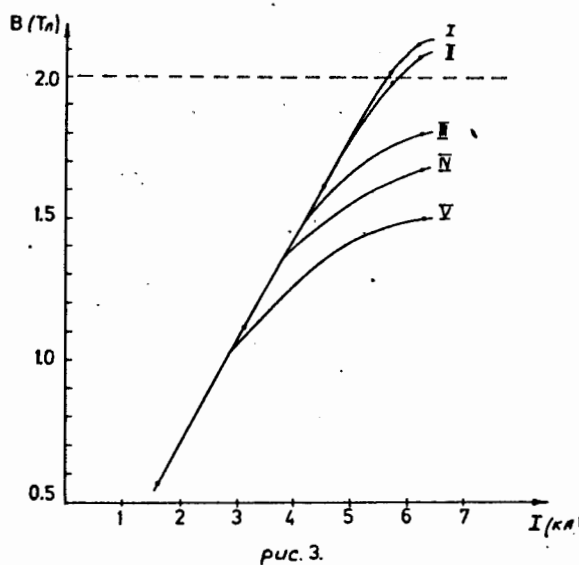


Рис. 3. Зависимость индукции магнитного поля в центре магнита от тока в обмотке. Кривые I - V соответствуют размерам сечения магнита ($a \times b$): 360x220, 320x200, 280x180, 220x160, 240x140 в мм^2 , соответственно.

с размерами ярма ($a \times b$): 320x200 мм^2 и 360x220 мм^2 и апертурой 130x56 мм^2 .

На рис. 4 представлены зависимости градиента магнитного поля в центре линзы от тока в обмотке при различных размерах железного ярма ($c \times d$). На рис. 5 приведены значения $K = G / B$ для различных сочетаний линз и магнитов. Условию (1.2) удовлетворяет сочетание линзы с размерами сердечника $c \times d = 360 \times 360 \text{ мм}^2$ и магнита с размерами $a \times b = 320 \times 200 \text{ мм}^2$.

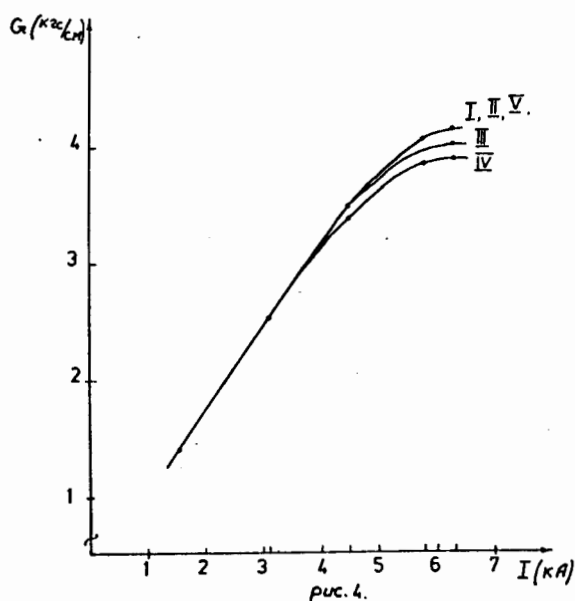


Рис. 4. Зависимость градиента магнитного поля в центре линзы от тока в обмотках. Кривые I-IV размерам поперечного сечения линзы ($c \times d$), I- 400x400 мм^2 , II- 360x360 мм^2 , III-360x220 мм^2 , IV-260x260 мм^2 , V-340x340 мм^2 .

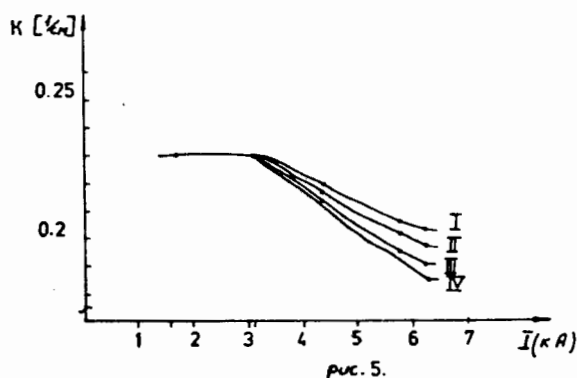


Рис. 5. Зависимость коэффициента $K = G / B$ от тока в обмотках элементов. Кривые I-IV соответствуют комбинациям линз и магнитов с различными поперечными сечениями в мм^2 ($c \times d$), ($a \times b$): I-(360x360), II-(360x360), (360x220), III-(360x220), IV-(360x220), (360x220).

В таблице I для данного сочетания линзы и магнита приведены характеристики дипольных и квадрупольных полей, рассчитанных с помощью GRIDS.

Таблица I.

I (кА)	$B(I)$ (Гс)	$G(I)$ (Гс/см)	$K = G/B$ (I/см)	$\Delta B/\Delta I$ (Гс/А)	$\Delta G/\Delta I$ (Гс/см·А)
1,5625	5607,1	1292,0	0,2304	3,587	0,821
3,1250	11213,0	2575,7	0,2297	3,491	0,568
4,5000	16013,4	3477,0	0,2176	2,826	0,542
5,8330	19781,4	4079,5	0,2062	2,448	0,258
6,2500	20802,3	4137,3	0,2013		

Для токов $I < 4,5$ кА удалось получить $\Delta K/K = 3 \cdot 10^{-3}$. Для выбранного сочетания магнита и линзы отклонения коэффициента K от постоянного уровня при токах $I \geq 4,5$ кА объясняется насыщением железного ярма в линзах.

В таблице 2 даны характеристики квадрупольных и дипольных полей, полученные с помощью программы POISSON для выбранного сочетания магнитов и линз, а также градиент магнитного поля G_1 для линзы с $(c \times d) = 340 \times 340$ мм².

Таблица 2.

I , кА	$B(I)$, Гс	$G(I)$ Гс/см	$G_1(I)$, Гс/см	$K = G/B$ (I/см)
1,5625	5604,4	1291,6	1410,9	0,233
3,1050	11210,4	2576,0	2498,0	0,223
4,5000	15951,3	3510,0	3356,1	0,210
5,8330	20044,6	4108,01	-2380,0	-0,118
6,2500	20420,0			

Как видно из таблицы 2, расчеты, проведенные с помощью программы POISSON дают $\Delta K/K = 297\%$. Отклонение K от номинального значения почти в 3 раза объясняется аномальным значением $G(I)$, которое по видимому не является физически достоверным по характеру разброса $G(I)$ на оси Ox ; на расстоянии $x = \pm 3$ см $\frac{G(x) - G(0)}{G(0)} = 0,5$ для токов $I \geq 5$ кА. Таким образом, программа POISSON для некоторых конфигураций линз не дает удовлетворительных результатов. В дальнейшем расчеты велись по программе GRIDS. На рис. 6 приведены зависимости $\Delta G(x)/G(0)$ и $\Delta B(x)/B(0)$ для выбранных магнитных элементов.

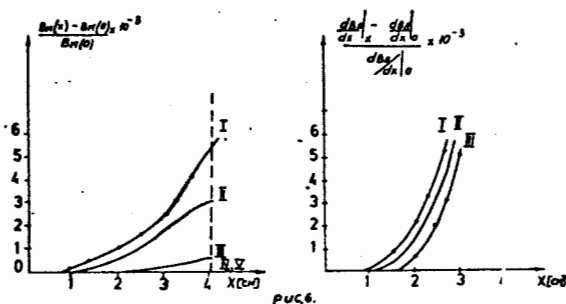


Рис. 6. Зависимость нелинейностей дипольных и квадрупольных полей от расстояний от центра элемента. а) - кривые I - У соответствуют следующим значениям тока в обмотке диполя 6,25 кА; 5,8 кА; 4,5 кА; 3,1 кА и 1,5 кА. в) - кривые I - III определяются значениями тока в обмотке линзы 1,5 кА; 4,5 кА, 6,25 кА соответственно.

Резкое возрастание величины $\Delta G(x)/G_1(0)$ на расстоянии $x = 2,5$ см от центра линзы объясняется влиянием полюса, который аппроксимируется ступенчатой огибающей. Влияние полюса на нелинейности квадрупольного поля можно уменьшить изменяя константу, определяющую образующую гиперболического полюса.

В таблице 3 приведены значения $G_1, C_1 \dots C_{18}$ (на радиусе $r = 1,5$ см) в линзе в зависимости от тока.

C_n - амплитуды гармоник Фурье-разложения для вектора-потенциала A;

$$B = \text{rot} A, \quad C_n = B_n/B_1$$

Таблица 3.

I, кА	2,25	3,1	5,8
G_1 Гс/см	1875,5	2575,6	4079,0
C_2 Гс	2258,0	3101,3	4911,0
$C_6, 10^{-4}$	1,892	1,800	1,479
$C_{10}, 10^{-4}$	0,030	0,030	0,11
$C_{14}, 10^{-4}$	0,001	0,001	0,001
$C_{18}, 10^{-4}$	0,000	0,000	0,000

Анализ рис. 6 таблицы 3 показывает, что для СП квадруполья, изображенного на рис. 1 в апертуре на ± 2 см возможно создание поля, близ-

кого к идеальному. Амплитуды высших гармоник при этом $\approx 10^{-4}$.

В таблице 4 приведены результаты расчета B_I, C (на радиусе $r = 1,8$ см) в магните, в зависимости от тока, где $B(0)$ – магнитное поле на оси магнита, а $B_I = r \cdot B(0)$.

Таблица 4.

$I, \text{ кА}$	1,6	4,5	6,3
$B(0), \text{ Гс}$	5607,1	16013	20801,8
$B_I, \text{ Гс}$	10092,8	28824	37443,2
$C_3, 10^{-4}$	0,0520	0,300	2,640
$C_5, 10^{-4}$	0,0021	0,011	0,100
$C_7, 10^{-4}$	0,003	0,001	0,004
$C_9, 10^{-4}$	0,000	0,000	0,000

Из расчетов видно, что дипольные поля получаются близкими к идеальным на радиусе $r = 2$ см от центра, при этом гармоники C_n имеют порядок 10^{-4} .

2. О точности расчетов

В данной работе точность вычислений с помощью программы определялась точностью математической модели, используемой при решении квазилинейного уравнения Пуассона. Для СП магнитов и квадрупольных линз были проведены соответствующие оценки. Для СП дипольного магнита был проведен расчет на 2 сетках с помощью программы `GRIDS`. Результаты приведены в таблице 5 для $r = 1$ см от центра магнита.

Таблица 5.

$I, \text{ кА}$	Сетка	B_0	B_I	B_3	B_5	B_7
1,5	h	5607,1	5607,1	0,91-02	0,12-03	0,64-05
	$h/2$	5607,1	5607,1	0,88-02	0,11-03	0,58-05
4,5	h	16016,3	16016,3	0,18	0,17-02	0,27-04
	$h/2$	16013,4	16013,4	0,17	0,16-02	0,28-04
6,25	h	20817,4	20816,5	0,17-01	0,19-01	0,27-03
	$h/2$	20802,1	20801,8	0,16-01	0,19-01	0,30-03

Анализ таблицы 5 дает возможность утверждать, что точность расчета характеристик магнитных полей с помощью программы `GRIDS` составляет для данных конфигураций 10^{-4} .

Кроме того, результаты расчета были сопоставлены с результатами, полученными с помощью программы `POISSON`. Для токов $I \leq 3,1$ кА

совпадение составило $2 \cdot 10^{-4}$, а для токов $I > 3,1$ кА совпадение 10^{-3} . Такое расхождение результатов связано по-видимому с разным числом узлов сетки используемых программами, так для GRIDS $N=3600$ точек, а для POISSON $N=1200$ точек. К тому же, как было отмечено выше, для рассматриваемых конфигураций магнитных элементов при токах $I > 5$ кА не всегда дает удовлетворительные результаты.

Таким образом, приведенные выше результаты численных экспериментов позволяют сделать следующие утверждения:

1. В диапазоне токов до $3,1$ кА удалось выполнить требование $\Delta K/K \approx 10^{-3}$. Для токов больше $4,5$ кА $\Delta K/K \approx 10^{-1}$. Поэтому при последовательном питании токовых обмоток магнитов и линз необходима система коррекции когерентного сдвига частот бетатронных колебаний.

2. В описанных выше дипольных системах возможно создание при индукциях $B = 2$ Тл в апертуре, на $r = 2$ см дипольных полей, близких к идеальному. При этом относительные амплитуды высших гармоник $\approx 10^{-4}$. В квадрупольных системах возможно создание при градиентах $4137,0$ (Гс/см) на расстоянии r от центра линзы $r \leq 2$ см, квадрупольных полей, близких к идеальному. При этом амплитуды высших гармоник, отнесенных к основной $\approx 10^{-4}$.

В заключение авторы выражают благодарность О.И.Юлдашеву за полезные обсуждения.

Литература

1. Baldin A. M. et al. In. Proc. 1983 Particle Accelerator Conf., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-30, No 4, 1983, p. 3247.
2. В.И.Котов, В.В.Миллер. Фокусировка и разделение по массам частиц высоких энергий. Атомиздат, М., 1969.
3. POISSON Group Programs. User's Guid. CERN, 1975.
4. Э.А.Айрян, Б.Н.Хоромский, И.И.Юдин, О.И.Юлдашев. ОИЯИ, РИИ-84-802, Дубна, 1984.
5. Mc. Iuturff A., Clauss I., Proc. of 3 rd Int. Conf. Maghet Technol., Hamburg, 1970, p.45.