

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

Б-824

9-88-25

**З.В.Борисовская, Е.П.Жидков, А.А.Смирнов,
Л.А.Смирнова, И.А.Шелаев**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КВАДРУПОЛЕЙ
ДЛЯ НУКЛОТРОНА**

1988

При выборе магнитной структуры нуклотрона ^{1/} рассматривались две основные конструкции линз регулярного периода: одна из них — с явно выраженными полюсами, другая — прямоугольная, типа линзы Пановского, аналогичная используемой в сверхпроводящем синхротроне СПИН ^{2/}. Каждая рассматривалась в качестве рабочей, исследовались ее характеристики, и по ним подбирался наиболее оптимальный вариант. Расчеты проводились с помощью двух систем программ: трехмерной MAGSYS, основанной на методе объемных интегральных уравнений ^{3/}, и двумерной POISCR ^{4/}, использующей метод сопряженных градиентов.

1. ЛИНЗА С ЯВНЫМИ ПОЛЮСАМИ

Исходя из основных требований, предъявляемых к градиенту линзы ~ 35 Т/м при максимальном рабочем токе $I \approx 6000$ А и эффективной длине ~ 42,5 см, был предложен первоначальный вариант симметричной линзы с гиперболическим полюсом. Численная модель, использованная в расчетах, представлена на рис. 1. Результаты расчетов по системе программ POISCR приведены в табл. 1. Видно, что с увеличением тока в сверхпроводящей обмотке до максимальных значений происходит сильное насыщение железного ярма. Значительная нелинейность градиента ($\Delta G/G$) = 23,83% обусловлена в основном насыщением полюса железного ярма, в особенности той его части, которая примыкает к обмоткам линзы. Этот вывод был подтвержден при численном моделировании вариантов II и III симметричной линзы (см. рис. 1). Полюс линзы в этих вариантах имеет форму части окружности с центром в точке пересечения граней ярма. Различаются эти варианты величиной радиуса окружности. Отсюда меняется величина и форма прокладки между обмоткой и полюсом. На рис. 2 представлена зависимость величины G/I (отношение градиента G к току) от изменения тока в обмотке. Как следует из табл. 2,

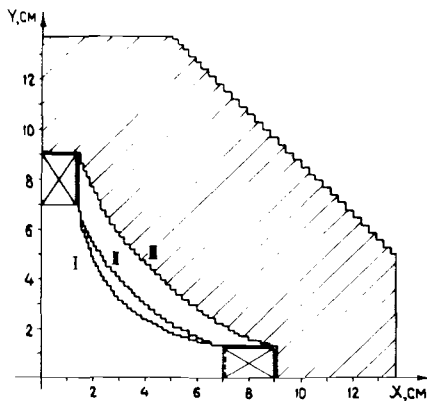
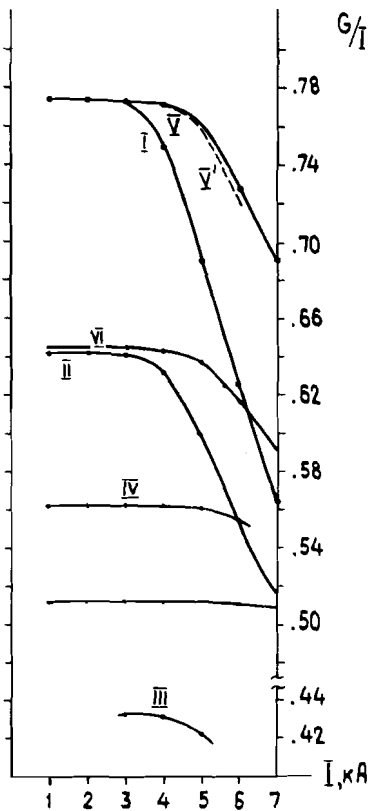


Рис. 1. Конфигурация поперечного сечения СП-линзы, использованная в расчетах.

Таблица 1

Величины H_2 , G , G/I , C_n в зависимости от числа ампер-витков СП-обмотки симметричной линзы с гиперболическим полюсом (вариант I)

	1000 A	2000 A	3000 A	4000 A	5000 A	6000 A
$C_2 = H_2, \text{ Э}$	1932,318	3863,862	5785,924	7490,751	8629,525	9362,894
$C_8, \%$	-0,199	-0,199	-0,200	-0,213	-0,236	-0,251
$C_{10}, \%$	0,018	0,192	0,017	0,017	0,017	0,016
$C_{14}, \%$	-0,0029	-0,003	-0,002	-0,001	-0,001	-0,001
$G, \text{ Э/см}$	772,9272	1545,5448	2314,3696	2996,3004	3451,810	3745,1576
$G/I, \text{ Э/см A}$	0,7729272	0,7727724	0,77145653	0,7490751	0,690362	0,6241929



$$G/I, \frac{\text{Э}}{\text{см} \cdot \text{А}}$$

Рис. 2. Распределение величины G/I (отношение градиента G к току) для нескольких вариантов СП-линз с явно выраженным полюсом в зависимости от изменения тока в обмотке.

где представлены результаты численного моделирования варианта II, она составляет $(\Delta G/G) = 13,95\%$. Видно, что нелинейность градиента в варианте III ниже, чем в случае I и II. Однако в варианте III линзы при максимальном токе в обмотке не достигим необходимый градиент $G_{\max} \approx 35 \text{ Т/м}$. Поэтому дальнейшие исследования различных конфигураций линз проводились с измененным положением обмоток относительно полюса. На рис. 3 представлены три таких варианта на фоне первого основного. Результаты численного моделирования этих вариантов представлены в табл. 3, 4 и 5. Видно, что нелинейность градиента при токе $I = 6000 \text{ А}$ (вариант IV) составляет $(\Delta G/G) =$

Таблица 2

Величины H_2 , G , G/I , C_n в зависимости от числа ампер-витков СП-обмотки симметричной линзы (вариант II)

	1000 A	2000 A	4000 A	5000 A	6000 A
$C_2 = H_2, \text{ Э}$	1602,743	3205,079	6310,329	7499,099	8274,755
$C_8, \%$	0,697	0,697	0,669	0,613	0,548
$C_{10}, \%$	0,065	0,065	0,068	0,073	0,107
$C_{14}, \%$	-0,132	0,097	0,101	0,110	0,186
$G, \text{ Э/см}$	641,0972	1282,0316	2524,1316	2999,6396	3309,902
$G/I, \text{ Э/см A}$	0,6410972	0,641058	0,6310329	0,5999279	0,55165033

Таблица 3

Величины H_2 , G , G/I , C_n в зависимости от числа ампер-витков СП-обмотки симметричной линзы с гиперболическим профилем полюса (вариант V)

	1000 A	2000 A	3000 A	4000 A	5000 A	6000 A
$C_2 = H_2, \text{ Э}$	1934,671	3869,238	5802,733	7720,616	9500,125	10903,01
$C_8, \%$	-0,159	-0,160	-0,160	-0,168	-0,171	-0,158
$C_{10}, \%$	0,018	0,018	0,018	0,018	0,020	0,017
$C_{14}, \%$	-0,0006	0,0005	0,0007	0,00018	0,004	0,003
$C_{18}, \%$	-0,0017	-0,0025	-0,0036	-0,0035	0,0026	-0,007
$G, \text{ Э/см}$	773,8684	1547,692	2321,0932	3088,2464	3800,05	4361,204
$G/I, \text{ Э/см A}$	0,7738684	0,773846	0,77369773	0,7720616	0,760010	0,7268673

$= 1,13\%$. Максимальный градиент достижим при токе в СП-обмотке $I = 6350 \text{ А}$. Этот вариант линзы (IV) уже можно считать рабочим. Но более предпочтительным является вариант симметричной линзы с гиперболи-

Таблица 4

Величины H_2 , G , G/I , C_n в зависимости от числа ампер-витков СП-обмотки симметричной линзы (вариант IV)

	1000 А	2000 А	3000 А	4000 А	5000 А	6000 А
$C_2 = H_2, \text{Э}$	1409,438	2818,848	4228,017	5635,765	7031,778	8360,711
$C_8, \%$	0,372	0,372	0,372	0,3718	0,366	0,360
$C_{10}, \%$	0,027	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
$C_{14}, \%$	-0,0117	-0,0005	-0,0007	-0,01	-0,0018	-0,002
$C_{18}, \%$	-0,005	-0,0017	-0,002	-0,002	-0,0017	-0,0018
$G, \text{Э/см}$	563,7752	1127,5392	1691,2068	2254,306	2812,7112	3344,2844
$G/I, \text{Э/см А}$	0,5637752	0,5637696	0,5637356	0,5635765	0,56254224	0,55738073

Таблица 5

Величины H_2 , G , G/I , C_n в зависимости от тока в СП-обмотке квадруполья с гиперболическим профилем полюса (вариант VI)

	1000 А	3000 А	4000 А	5000 А	5600 А	6000 А
$C_2 = H_2, \text{Э}$	1612,888	4837,731	6444,418	7963,201	8765,411	9243,312
$C_8, \%$	-0,121	-0,121	-0,122	-0,1296	-0,133	-0,131
$C_{10}, \%$	0,022	0,022	0,022	0,021	0,023	0,023
$G, \text{Э/см}$	645,1552	1935,0924	2577,7672	3185,2804	3506,1644	3697,3248
$G/I, \text{Э/см А}$	0,6451552	0,6450308	0,6444418	0,63705608	0,62610075	0,6162208

ческой формой полюса основного варианта, но со смещенными к центру линзы на максимально возможное расстояние обмотками. Смещение находится исходя из расчетов ^{5/} в зависимости от заполнения пучком апертуры магнитных элементов нуклотрона при медленном выводе.

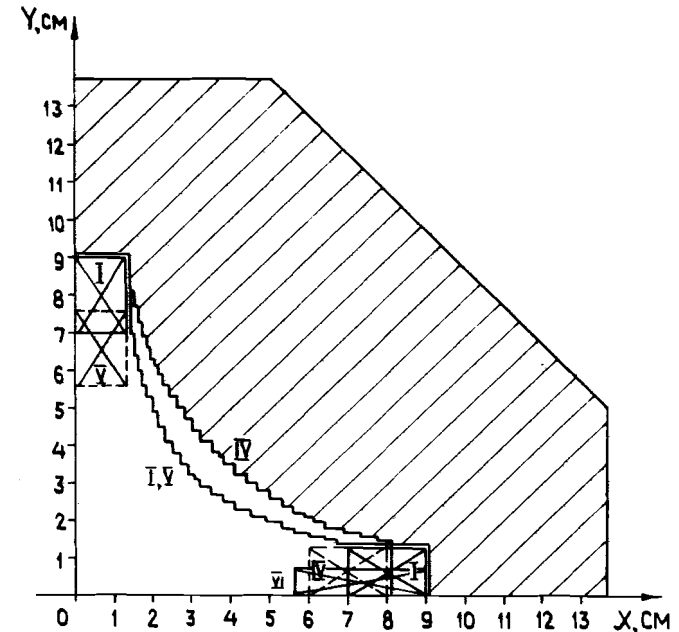


Рис. 3. Конфигурация поперечного сечения нескольких вариантов СП-линз с явно выраженным полюсом.

Нелинейность градиента в этом случае составляет $(\Delta G/G) = 0,23\%$ при токе в СП-обмотке $I = 4600$ А. Это ток, при котором достигим максимальный градиент $G = 35$ Т/м. На рис. 2 этому варианту соответствует кривая V. Как и следовало ожидать, если свободное пространство между обмоткой и железным ярмом в этом варианте гиперболической линзы заполнить прокладкой, то характер изменения величины G/I в зависимости от тока остается тем же. Лишь слегка упадет само значение градиента при тех же токах. На рис. 2 этому варианту соответствует пунктирная линия.

Таким образом, можно отметить пока два рабочих варианта симметричной линзы для регулярного периода нуклотрона, каждый из которых обладает своими преимуществами. Для варианта с гиперболической формой полюса характерна меньшая нелинейность градиента и, как будет видно (вариант VI), наименьшее значение 12-полюсной гармоники. Вариант с формой полюса по окружности привлекает простотой изготовления. Максимальный градиент достигается при тех же токах, что и для дипольного магнита регулярного периода ^{6/}.

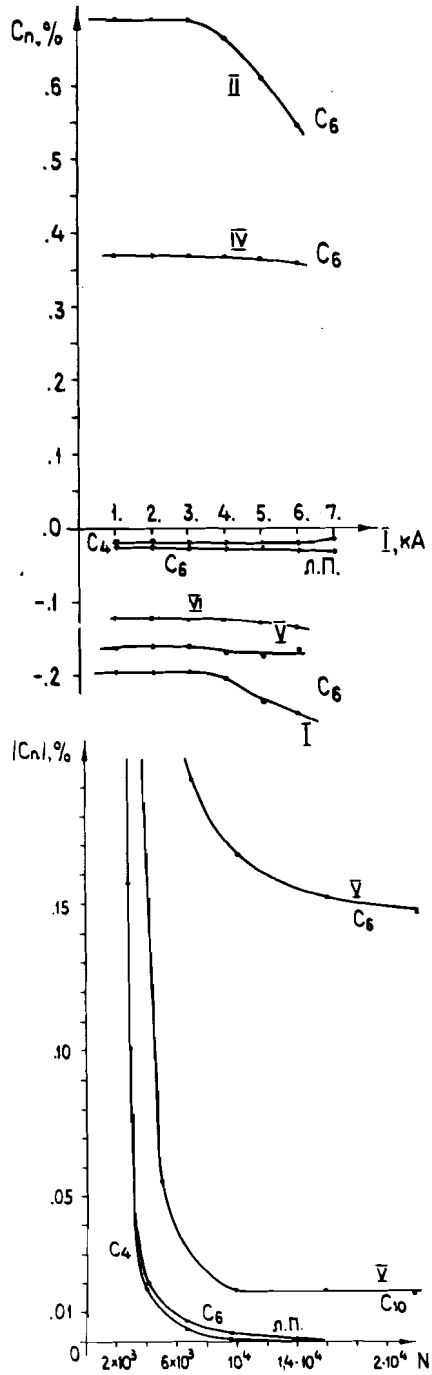
Перейдем теперь к исследованию нелинейностей в центральной области рассмотренных вариантов линз в терминах гармоник поля ^{6/}. Исследования для всех конфигураций линз проводились на радиусе $R =$

Рис. 4. Изменение относительных амплитуд высших гармоник (C_4 , C_6) для двух типов СП-линз в зависимости от изменения тока в обмотке.

= RN = 2,5 см. Он удобен тем, что является рабочим и для прямоугольной линзы. На рис. 4 представлен характер изменения относительной амплитуды 12-полюсной (C_6) гармоники при увеличении тока в СП-обмотке. Как известно, в симметричных линзах теоретически должна отсутствовать октупольная (C_4) гармоника. Ее наличие или отсутствие в изготовленных линзах говорит о точности изготовления железных полюсов ярма. Проведенные методические расчеты показали, что неточность изготовления гиперболического профиля на 0,1 мм приводит к появлению октупольной гармоники $C_4 \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$. Как видно из рис.4, одно изменение формы полюса не дает уменьшения величины гармоники. Уменьшение величины 12-полюсной гармоники достигается при смещении обмотки к центру линзы.

Для оценки точности расчетов симметричной линзы численное моделирование проводилось при числе узлов сетки от $N = 700$ до $N = 22000$. Как показали результаты расчетов, представленные на рис.5, минимально необходимое число узлов сетки для описания полюса и всего железного экрана $N = 10000$. При этом точность вычисления гра-

Рис. 5. Зависимость точности расчетов относительных амплитуд высших гармоник (C_4 , C_6) от числа узлов расчетной сетки для двух типов СП-линз.



диента G составляет $\sim 1,1 \cdot 10^{-3}$, а $\Delta C_n = 1,5 \cdot 10^{-4}$. Для $N = 16000$ узлов точность вычисления градиента для данной конфигурации линзы $\sim 7,7 \times 10^{-4}$, а $\Delta C_n = 5 \cdot 10^{-5}$. Основные результаты были получены при $N = 10000$. Расчеты симметричных линз по системе программ MAGSYS пока не проводились. Для оценки длины симметричных линз по железному ярму можно воспользоваться методикой, предложенной в работе^{/7/}. Тогда в варианте (VI) симметричной линзы с гиперболическим профилем полюса длина линзы по железному ярму $L_{Fe} = 39,1$ см.

2. КВАДРУПОЛЬ С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ АПЕРТУРОЙ

Результаты численного моделирования СП-квадруполя с прямоугольной апертурой для сверхпроводящего синхротрона СПИН достаточно подробно представлены в работе^{/2/}. Рассматриваемый вариант СП-квадруполя для нуклотрона отличается размерами, числом ампервитков и диапазоном изменения тока в обмотке. Поэтому в данной работе мы рассматриваем только те результаты расчетов, в которых видны отличия от предыдущего варианта.

Численная модель, использованная в расчетах по трехмерной методике, представлена на рис. 6. Конфигурация поперечного сечения СП-квадруполя приведена на рис. 7. Расчеты по системе программ POISCR проводились при $N = 6500$ узлов расчетной сетки. Как видно из рис. 5, это минимально необходимое число узлов сетки при точности расчетов $\sim 10^{-4}$ по градиенту и 10^{-5} по нелинейностям для данного типа линзы. В табл. 6 представлены результаты расчетов зависимости величины градиента и нелинейностей от изменения тока в СП-обмотке до $I = 7000$ А. Видно, что с увеличением тока до максимального значения величины относительных амплитуд нелинейностей остаются практически постоянными. Величина нелинейной зависимости градиента от тока, рассчитанная по системе программ POISCR, составляет $(\Delta G/G) = 0,006\%$.

Соотношение размеров апертуры СП-квадруполя регулярного периода синхротрона СПИН и нуклотрона 1:1,75, а отношение длин по железному ярму 1:3. Поэтому ожидалось, что на центральное поле не будут оказывать влияние быстрее насыщающиеся торцы. Проведенные расчеты по системе программ MAGSYS подтвердили этот вывод. На рис. 8 представлено распределение градиента G вдоль оси квадруполя для $I = 6000$ А, а также распределение величин относительных амплитуд октупольной и 12-полюсной гармоник вдоль оси квадруполя в зависимости от изменения тока в обмотке. Величина относительной амплитуды октупольной (C_4) гармоники заметно меняется на торцах квадруполя. Величина относительной амплитуды C_4 гармоники $< 0,1\%$ по всей длине квадруполя и на торцах. Расчетные значения интегральных амплитуд C_4 - и C_6 -гармоник, полученные в результате чис-

Рис. 6. Численная модель СП-обмотки линз с прямоугольной апертурой.

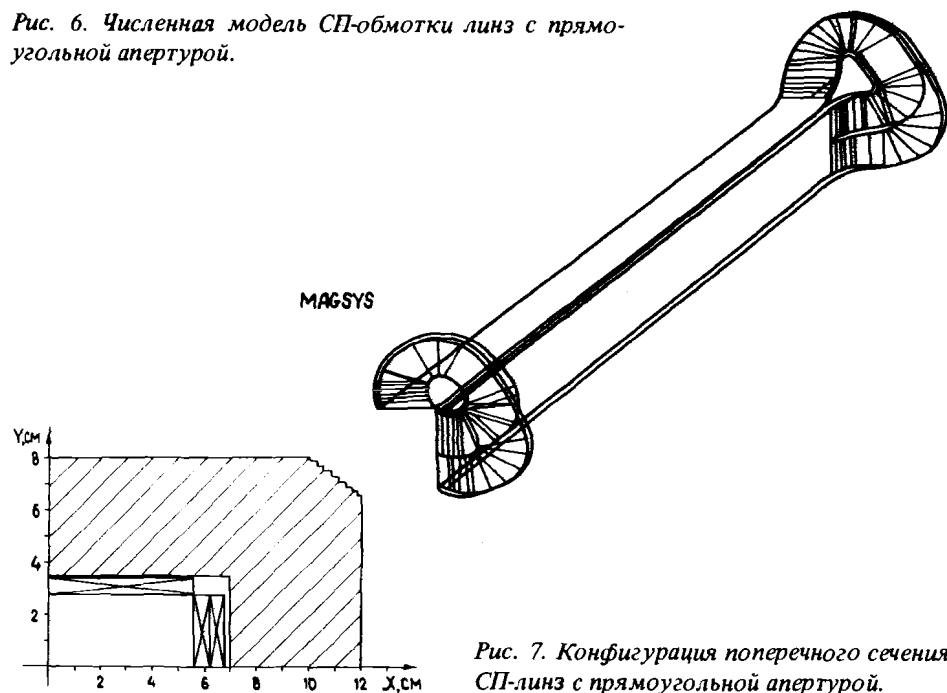


Рис. 7. Конфигурация поперечного сечения СП-линз с прямоугольной апертурой.

Таблица 6
Величины H_2 , G , G/I , C_n в зависимости от тока в СП-обмотке квадруполь с прямоугольной апертурой (центральная область)

	1000 А	3000 А	4000 А	5000 А	6000 А	7000 А
$C_2 = H_2, \text{ Э}$	1281,850	3845,468	5127,317	6409,216	7690,912	8972,403
$C_4, \%$	0,0010	-0,0032	-0,0042	-0,0014	-0,0015	0,00298
$C_6, \%$	-0,0004	-0,0053	-0,0073	-0,0028	-0,0044	-0,0025
$C_8, \%$	-0,0009	-0,0044	-0,0046	-0,0020	-0,0041	-0,0020
$C_{10}, \%$	0,00298	0,0012	0,0015	0,0032	0,0026	0,00297
$G, \text{ Э/см}$	512,7400	1538,1872	2050,9268	2563,6864	3076,3648	3588,9612
$G/I, \text{ Э/см А}$	0,5127400	0,51272906	0,5127317	0,51273728	0,51272746	0,51270874

ленного интегрирования этих кривых, представлены в табл. 7. Видно, что несмотря на заметное изменение C_4 -гармоники на торцах интегральные амплитуды октупольной гармоники (C_4) $< 0,1\%$ на радиусе $r = 2,5$ см. В табл. 7 представлена также зависимость эффективной длины СП-линзы от тока и от величины изоляционной прокладки Δ между об-

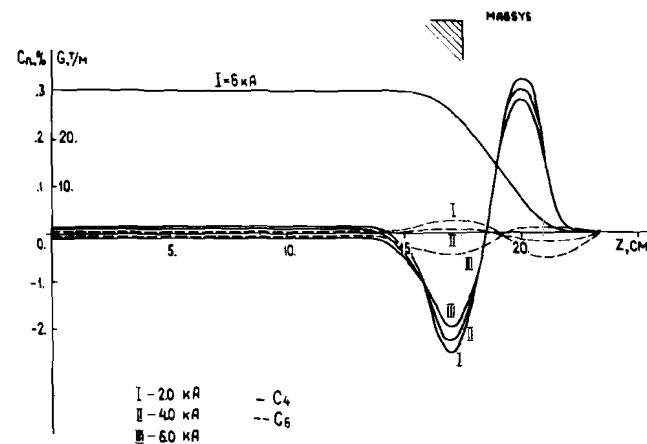


Рис. 8. Распределение градиента (G) и относительных амплитуд высших гармоник (C_4 , C_6) вдоль оси квадруполь для различных значений тока в СП-обмотке.

моткой на торцах и железным ярмом. Из анализа полученных результатов и технических допусков на минимальную величину прокладки однозначен выбор величины $\Delta = 1,5$ см. Кроме того, следует учесть, что для достижения $L_{\text{эф}} = 42,5$ см необходимо, чтобы длина линзы по железному ярму $L_{\text{Fe}} \approx 39,0$ см. Нелинейная зависимость величины градиента от тока составляет $(\Delta G/G) = 1,3\%$ исходя из расчетов по трехмерной методике.

Таким образом, проведенные расчеты показали, что в качестве квадруполь регулярной структуры ускорителя релятивистских ядер — нуклотрона можно использовать как оптимизированный вариант СП-квадруполь с прямоугольной апертурой, так и подобранный вариант (VI) симметричной линзы с гиперболическим профилем полюса. Можно сказать, что при точности расчетов гармоник $\sim 10^{-5}$ у обоих вариантов СП-линз отсутствует октупольная (C_4) гармоника. У СП-квадруполь с прямоугольной апертурой нелинейная зависимость градиента от тока имеет наименьшее значение. Также на порядок меньше величина относительной амплитуды 12-полюсной (C_6) гармоники. Однако использовать СП-квадруполь с прямоугольной апертурой типа линзы Пановского можно только в качестве фокусирующих линз регулярного периода

Таблица 7

Интегральные характеристики СП-квадруполя с прямоугольной апертурой

		I = 2000 А	I = 4000 А	I = 6000 А
$L_{Fe} = 35,0$ $\Delta = 2,0$ см	$L_{эф}$, см	37,56	37,13	36,80
	C_4 , %	0,08	0,09	0,13
	C_6 , %	-0,09	-0,018	-0,027
$L_{Fe} = 36,0$ $\Delta = 1,5$ см	$L_{эф}$, см	38,37	38,00	37,57
	C_4 , %	0,03	0,04	0,11
	C_6 , %	-0,011	-0,023	-0,030
$L_{Fe} = 38,0$ $\Delta = 0,5$ см	$L_{эф}$, см	40,13	39,68	39,29
	C_4 , %	-0,09	-0,01	0,24
	C_6 , %	-0,032	-0,026	-0,017

нуклотрона, стремясь достичь минимума по расходу железа. В качестве дефокусирующих линз необходимо выбрать линзы с расширенной апертурой^{5/}. Технологически желательно иметь все СП-квадруполи одного типа. Подобранный вариант линзы с гиперболическим профилем полюса имеет однослойную обмотку на полюсе, что при трубчатом сверхпроводнике, используемом в магнитных элементах нуклотрона, более удобно при изготовлении. Максимальный градиент для этой линзы достигим уже при $I = 5600$ А. В настоящее время в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ приступили к изготовлению СП-линз выбранного варианта (VI).

ЛИТЕРАТУРА

1. Baldin A.M. et al. – IEEE Trans. Nucl. Sci., 1983, NS-30, No.4, p.3247.
2. Борисовская З.В. и др. ОИЯИ, 9-84-523, Дубна, 1984.
3. Борисовская З.В. и др. ОИЯИ, Б1,9-85-232, Дубна, 1985.
4. Holsinger R.F., Iselin C. The CERN-POISSON Program Package (POISCR) User Guide, 1983.

5. Василюшин Б.В. и др. ОИЯИ, 9-86-512, Дубна, 1986.

6. Борисовская З.В. и др. ОИЯИ, 9-86-714, Дубна, 1986.

7. Bryant P.J. Lectures given in the Academic Training Programme of CERN, 1983-1984, Geneva, 1984.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 января 1988 года.