

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

9-84-523

З.В.Борисовская, В.С.Алфеев, С.Б.Ворожцов,
А.М.Донягин, В.И.Лобанов, И.А.Шелаев

ТРЕХМЕРНЫЙ РАСЧЕТ
ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СИНХРОТРОНА ОИЯИ

1984

ВВЕДЕНИЕ

К числу работ, ведущихся в ЛВЭ по исследованию сверхпроводящих магнитных систем, относятся расчеты трехмерных магнитоэстатических полей магнитной системы сверхпроводящего модельного синхротрона /СПИН/^{1/}. Магнитная система ускорителя состоит из импульсных сверхпроводящих /СП/ дипольных магнитов и СП линз регулярных периодов и согласованных промежутков^{2/}.

В работе приводятся результаты численного моделирования элементов магнитной системы и анализа нелинейных эффектов при различных значениях тока в витке сверхпроводящей обмотки.

Расчеты выполнялись на основе метода объемных интегральных уравнений с помощью разработанной в ОИЯИ специализированной системы программ MAGSYS^{3/}.

Структура системы программ MAGSYS при счете на CDC-6500 позволяет увеличить, по сравнению с GFUN3D^{4/}, число элементов разбиения области магнитного экрана до ~200, а возможность интерактивного использования графического устройства /дисплея/ облегчает задачу создания обмоток и железного экрана необходимой конфигурации.

1. ДИПОЛЬНЫЙ МАГНИТ

Для поворотного СП магнита, численная модель которого представлена на рис.1, с компенсированной по длине амплитудой секступольной и декапольной гармоник получены распределения основной компоненты поля и нелинейностей для центральной области магнита /рис.2, табл.1/ и вдоль оси /рис.3/, в зависимости от величины тока в СП обмотке.

Все расчетные величины приводятся для $r = 2,5$ см, что составляет 91% апертуры диполя по обмотке. В расчетах учитывалась табличная зависимость $\mu = \mu(B)$ для данного сорта трансформаторной стали, из которой изготовлено ярмо СП диполей и квадруполей.

Неоднородность в апертурах СП диполей и квадруполей определялась по величинам амплитуд высших пространственных гармоник магнитного поля, отнесенных к основной^{5/}.

Исследование зависимости точности расчетов по MAGSYS для дипольного магнита без компенсирующей прокладки от числа элементов разбиения области железного экрана позволило выбрать оптимальный по времени и точности расчетный вариант /48 элементов на 1/8 части всего магнитопровода/.



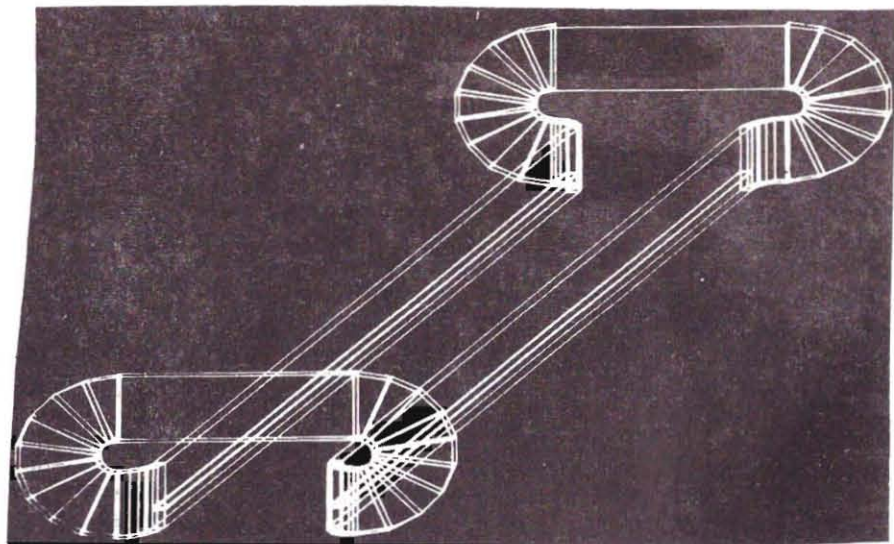


Рис.1. Численная модель СП обмотки дипольного магнита.

Таблица 1

Величины $B_I(T)$ и C_n /% / на $r = 2,5$ см для центральной области диполя / 0 ± 10 см / в зависимости от тока (I) в СП обмотке

	500 А	1000 А	1500 А	1750 А	2000 А	2500 А
B_I, T	0,5379	1,06875	1,5978	1,8567	2,1024	2,5263
	0,5465	1,0919	1,6332	1,8982	2,1459	2,5768
$C_3, \%$	-0,03	-0,091	-0,19	-0,13	0,60	3,14
$C_5, \%$	-0,11	-0,083	0,066	0,13	0,58	0,75
$C_7, \%$	-0,13	-0,005	-0,026	-0,045	-0,038	0,23

Сравнивая значения основной компоненты поля при различных значениях тока, полученные из расчетов по MAGSYS /табл.1/, с аналогичными распределениями, полученными в измерениях индукционными катушками при температуре жидкого гелия одного из рабочих магнитов /табл.2/, видно, что отличие составляет от 0,4% до ~2,0%. Это связано, вероятно, с выбранным вариантом разбиения, который настроен на расчет нелинейностей на торцах магнита. Во второй строке табл.1 приводятся значения основной компонен-

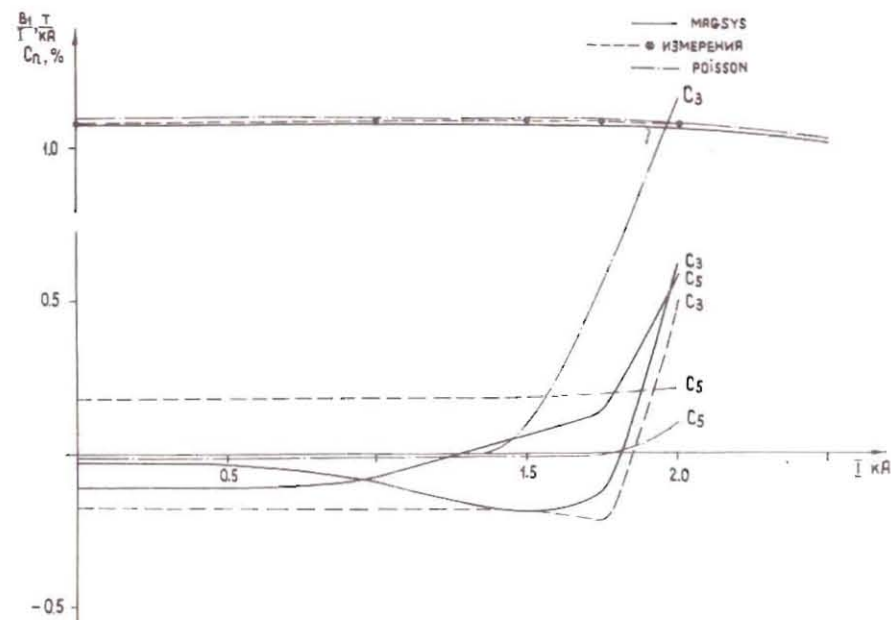


Рис.2. Распределение отношения основной компоненты поля к числу ампер-витков, а также нелинейностей, в зависимости от тока для центрального поля диполя.

Таблица 2

Измерения индукционными катушками поля в центре диполя при 4,2 К

	-500 А	-1000 А	-1500 А	-1750 А	-2000 А
B_I, T	0,5399	1,0819	1,6234	1,8926	2,1511
$C_3, \%$	-0,174	-0,179	-0,182	-0,219	0,501
$C_5, \%$	0,185	0,180	0,187	0,199	0,213
$C_7, \%$	0,410	0,428	0,430	0,422	0,396

ты поля, полученные с более подробным разбиением железного экрана в центральной области магнита. Эти значения хорошо согласуются /-0,6%/ с расчетами по POISSON /табл.3/ для всех рабочих значений тока^{1/6/}.

Таблица 3
(POISSON)

Величины B_1 / T и $C_n / \%$ на радиусе $r = 2,5$ см
в зависимости от тока $I A$

	500 A	1000 A	1500 A	2000 A	2500 A
B_1, T	0,5481	1,0963	1,7412	2,1443	2,5796
$C_3, \%$	-0,0	-0,003	0,102	1,164	2,768
$C_5, \%$	-0,016	-0,012	0,007	0,099	0,369
$C_7, \%$	0,135	0,134	0,128	0,084	-0,011

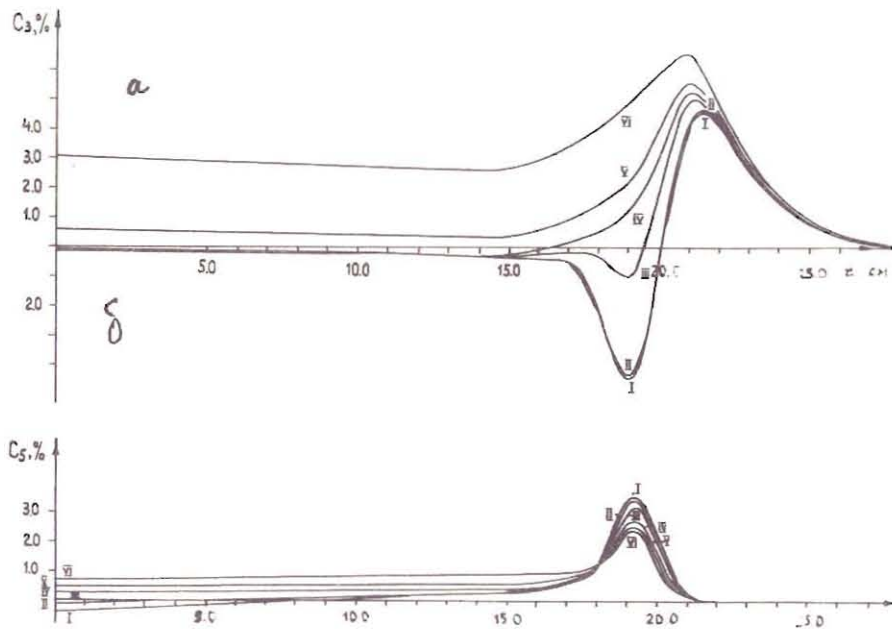


Рис.3. Распределение амплитуд относительных гармоник а/ C_3 и б/ C_5 вдоль оси диполя в зависимости от тока в СП обмотке: I кривая соответствует току 0,5 кА, II - 1,0 кА, III - 1,5 кА, IV - 1,75 кА, V - 2,0 кА, VI - 2,5 кА.

Наибольший интерес представляют полученные с помощью системы программ MAGSYS распределения нелинейностей вдоль оси магнита в зависимости от числа ампер-витков в СП обмотке /рис.3/.

Рис.4. Распределение интегральных нелинейностей поля СП диполя в зависимости от тока.

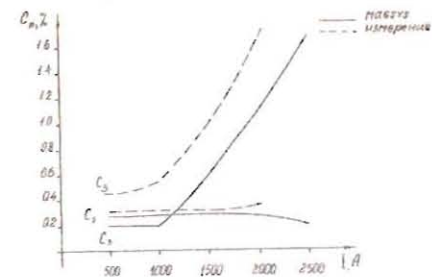


Таблица 4
(MAGSYS)

Интегральные значения величины $C_n / \%$ в зависимости от тока в СП обмотке диполя

	500 A	1000 A	1500 A	1750 A	2000 A	2500 A
$C_3, \%$	0,20	0,20	0,61	0,85	1,098	1,69
$C_5, \%$	0,238	0,237	0,240	0,237	0,231	0,193
$C_7, \%$	0,010	-0,02	-0,03	-0,01	-0,12	-0,02

Видно, что насыщение ярма дипольного магнита начинает сказываться на амплитуде секступольной гармоники при полях $\sim 1,85 T$ для центрального поля, а на торцах амплитуда секступольной гармоники заметно увеличивается уже при индукции поля $\sim 1,2 T$ /рис.3а/. Это приводит к тому, что расчетные значения интегральных амплитуд секступольной гармоники /рис.4/, полученные численным интегрированием кривых /рис.3а/, также возрастают при полях $\sim 1,2 T$ /табл.4/.

Для контроля за величиной амплитуды секступольной гармоники на полюсах рабочих магнитов укреплены плоские корректирующие обмотки.

Амплитуда декапольной гармоники на торцах магнита с увеличением тока в СП обмотке ведет себя иначе. При возрастании индукции поля ее значение уменьшается. Поэтому расчетное значение интегральной амплитуды декапольной гармоники, равное $\sim 0,2\%$, остается практически постоянным для всех значений индукции поля /рис.4/.

Интегральная амплитуда додекапольной гармоники и ее значение в центре для всех рабочих значений тока $\leq 0,01\%$, что находится за пределами точности расчетов.

Таблица 5

Интегральные значения величин B_1/T и $C_n/\%$, полученные в измерениях индукционными катушками при 4,2 К

	-500 А	-1000 А	-1500 А	-1750 А	2000 А
B_1, T	0,5435	1,0885	1,6145	1,8708	2,1122
	-500 А	-1000 А	-1500 А	-1750 А	2000 А
$C_3, \%$	0,453	0,547	1,030	1,286	1,715
$C_5, \%$	0,307	0,320	0,319	0,332	0,346
$C_7, \%$	0,111	0,110	0,106	0,106	0,099

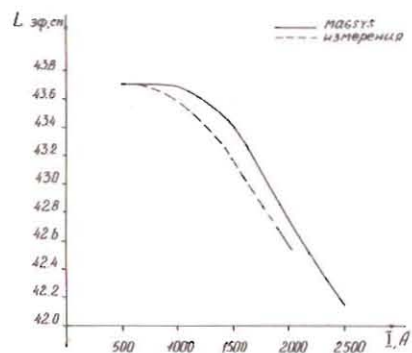


Рис.5. Характер изменения эффективной длины диполя в зависимости от изменения тока в СП обмотке.

Значения интегральных амплитуд секступольной, декапольной и додекапольной гармоник, полученные в измерениях индукционными катушками при температуре жидкого гелия, представлены в табл.5. Видно, что измеренные значения несколько выше расчетных, но характер их изменения в зависимости от тока аналогичен расчетным.

На рис.5 показана зависимость эффективной длины $L_{эф}$ дипольного магнита от изменения тока в СП обмотке до 2000 А, полученная в измерениях индукционными катушками при температуре жидкого гелия одного из рабочих магнитов и в результате численного интегрирования расчетных значений поля по всей длине СП диполя. Видно, что насыщение торцов магнита сказывается на величине $L_{эф}$ при токе $I \geq 1,2$ кА, на основании расчетов, и уже при токе $> 1,0$ кА по измерениям.

Определение эффективной длины дипольных магнитов проводилось индукционными катушками при комнатной температуре $^{1,7/}$ / $I = 50$ А/. Средняя эффективная длина дипольных магнитов составила 43,71 см. Как видно /рис.5/, это значение с точностью $\sim 0,8 \cdot 10^{-3}$ совпадает со значением, полученным из расчетов по MAGSYS.

2. КВАДРУПОЛЬНАЯ ЛИНЗА РЕГУЛЯРНОГО ПЕРИОДА

При исследовании двумерного магнитного поля СП линзы типа линзы Пановского было показано, что при индукциях поля $B \leq 1,5$ Т на радиусе $r = 1,5$ см можно создать чисто квадрупольное поле. При этом относительные амплитуды высших гармоник $C_n \sim 10^{-4}$ /8/.

Ниже приводятся результаты расчета трехмерного магнитного поля СП квадрупольной линзы и анализа нелинейностей при разных уровнях индукции на полюсах.

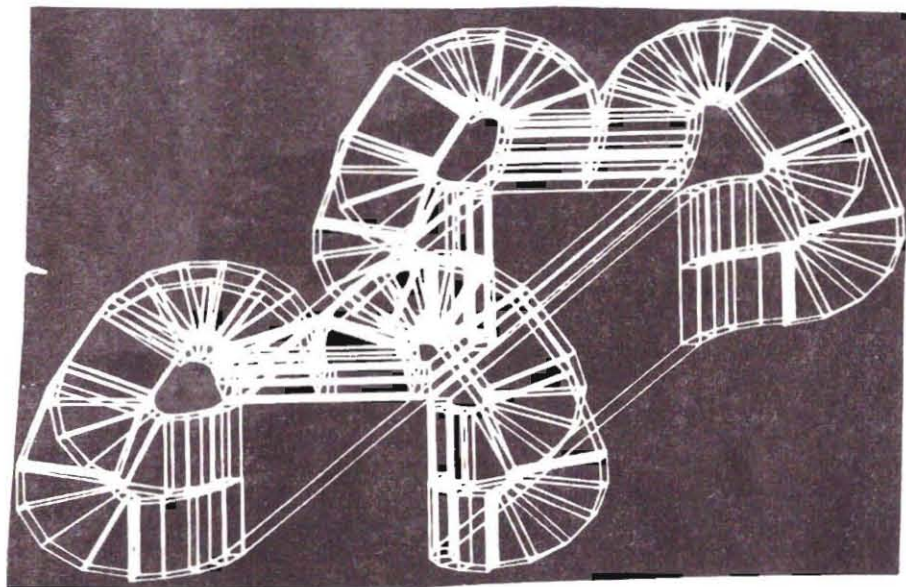


Рис.6. Численная модель СП обмотки линзы /линзы Пановского/регулярного периода.

Численная модель обмотки СП квадрупольной линзы представлена на рис.6. Для рабочих значений тока в витке СП обмотки $0,5 \text{ кА} \leq I \leq 1,7 \text{ кА}$ были получены распределения величины G /градиент поля/, G/I /отношение градиента к величине тока в витке/ и относительных амплитуд высших гармоник C_n для центра линзы /табл.6 и рис.7/ и вдоль ее оси /см. рис.8/. Для центра линзы они приведены в сравнении с результатами, полученными по известной программе POISSON^{8/} /табл.7/.

Таблица 6

Величины G , G/I , H_2 , C_n /на радиусе $r = 1,5$ см/
в зависимости от числа ампер-витков СП обмотки
для центральной области квадрупольа

	POISSON				
	500 A	1000 A	1500 A	2000 A	500 A
G , Гс/см	2686,2	5371,9	8037,3	10600,0	1548,5
G/I , Гс/сМА	5,3724	5,3719	5,3580	5,3000	3,0971
H_2 , Гс	4029,3	8057,9	12056,0	15900,0	2322,8
C_4 , %	0,05	0,04	-0,10	-0,53	-5,36
C_6 , %	-0,08	-0,08	-0,07	0,04	0,125
C_8 , %	0,05	0,05	0,06	0,07	0,03
C_{10} , %	-0,06	-0,06	-0,06	-0,07	-0,004

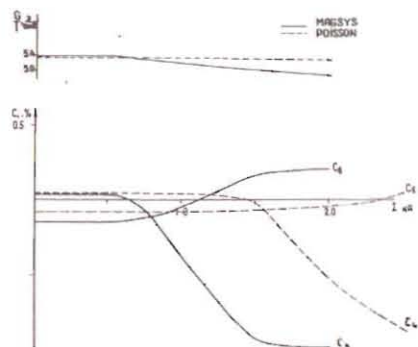


Рис.7. Распределение амплитуд относительных гармоник и величины G/I в зависимости от тока I кА для центрального поля СП квадрупольа.

Как видно из таблиц, величина нелинейной зависимости градиента $\Delta G/G$ от тока составляет $\sim 5,6\%$ из расчетов по MAGSYS и $\sim 0,4\%$ — по программе POISSON. Значение градиента G для квадрупольа без железного экрана при токе $I = 0,5$ кА отличается, соответственно, на $2,6\%$. Распределение относительных амплитуд высших гармоник поля при изменении тока в рабочем диапазоне /до $\sim 1,7$ кА/ также несколько отличается от полученных по программе POISSON/см.рис.7/.

Таблица 7

Величины G , G/I , H_2 , C_n /на радиусе $r = 1,5$ см/
в зависимости от числа ампер-витков СП обмотки
для центральной части квадрупольа

	MAGSYS				
	500 A	1000 A	1500 A	2000 A	500 A
G , Гс/см	2705,3	5167,6	7575,1	9782,3	1508,1
G/I , Гс/сМА	5,4106	5,1576	5,0501	4,8912	3,016
H_2 , Гс	4057,9	7751,5	11362,6	14673,4	2262,1
C_4 , %	0,04	-0,38	-0,92	-0,98	-5,46
C_6 , %	-0,147	-0,04	0,17	0,21	0,141
C_8 , %	-0,345	0,03	0,34	0,31	0,08
C_{10} , %	0,021	0,089	0,23	0,22	0,001

Величина C_4 в рабочем интервале значений тока растет, а C_6 убывает по абсолютной величине быстрее, чем это следует из расчетов по двумерной методике. Поведение C_8 с ростом тока аналогично C_6 , а при расчетах по POISSON ее значение приблизительно постоянно.

Проведенные методические оценки точности расчетов по программе MAGSYS показали, что различие в результатах вызвано, в основном, учетом конечных размеров СП квадрупольа.

Если увеличить длину линзы только в 2 раза, то величина градиента G для центрального поля такой линзы при токе $I = 1,0$ кА возрастет на $2,3\%$. Отсюда можно сделать заключение о том, что для магнитов с малым значением отношения апертуры к длине применение системы программ POISSON является неоправданным, поскольку учет реальных размеров является определяющим.

На рис.8 представлено распределение относительных амплитуд высших гармоник вдоль оси линзы для различных значений тока в обмотке. Все C_n на торцах линзы увеличиваются с ростом тока, но не становятся больше $0,8\%$. Расчетные значения интегральных амплитуд, полученные в результате численного интегрирования этих кривых, представлены в табл.8. Видно, что амплитуды высших гармоник не превышают $0,2 \pm 0,3\%$ основной на радиусе, составляющем 90% радиуса СП обмотки. Измерения индукционными катушками гармонического состава нелинейностей магнитного поля подтвердили

Таблица 8
(MAGSYS)

Эффективная длина СП квадруполя регулярного периода и интегральные величины $C_n / r = 1,5 \text{ см}$ в зависимости от тока

	0,5 кА	1,0 кА	1,5 кА	2,0 кА
$L_{\text{эф}}$, см	13,89	13,86	13,77	13,61
C_4 , ‰	0,07	0,11	0,175	0,238
C_6 , ‰	0,033	0,05	0,06	0,084
C_8 , ‰	-0,007	0,125	0,237	0,338
C_{10} , ‰	0,003	0,01	0,058	0,09

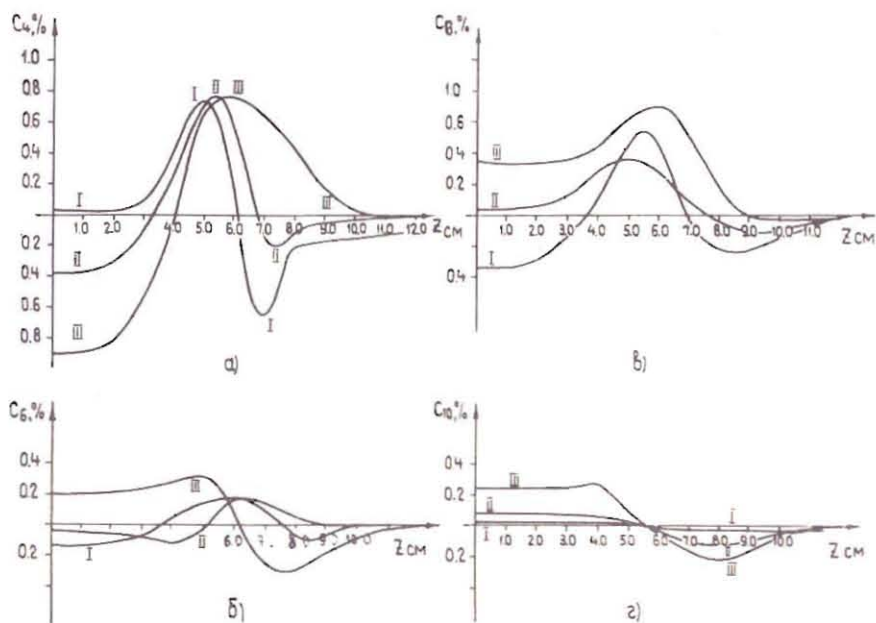


Рис.8. Распределение нелинейностей поля вдоль оси СП квадруполя в зависимости от тока в обмотке: I кривая соответствует току 0,5 кА, II - 1,0 кА, III - 1,5 кА.

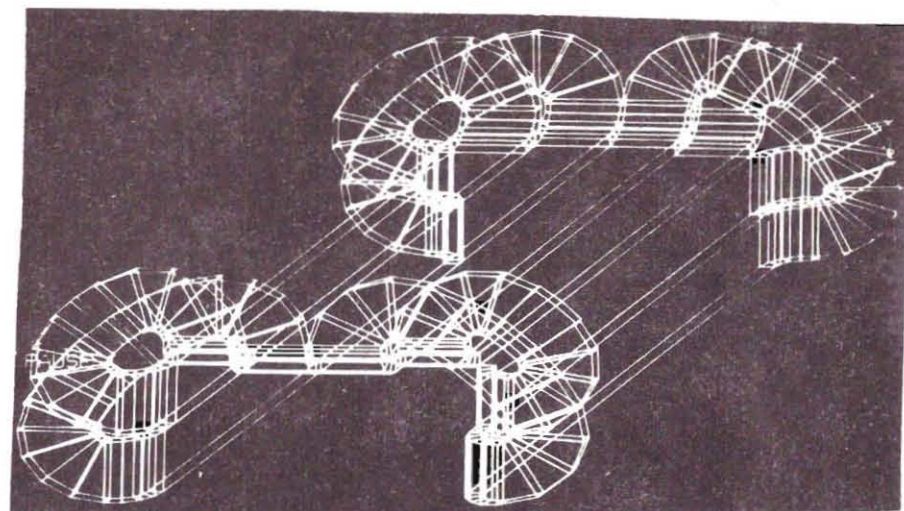
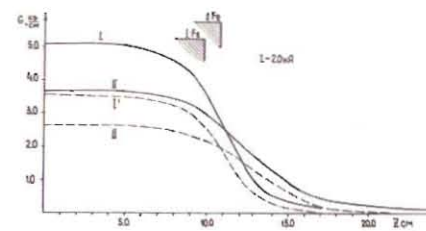


Рис.9. Численная модель обмотки СП квадруполя согласованного промежутка.

Рис.10. Распределение величины G /градиента/ линз согласованного промежутка: I соответствует линзе Ф, II - линзе Д. Пунктиром отмечено распределение градиента (G) для линз без железного экрана.



полученные в расчетах величины. Значение эффективной длины СП квадруполя в зависимости от числа ампер-витков, полученное из расчетов по MAGSYS, представлено в табл.8. Оно отличается от полученного в результате измерений индукционными катушками при комнатной температуре [7].

3. ЛИНЗЫ СОГЛАСОВАННОГО ПРОМЕЖУТКА

Численная модель обмотки Ф- и Д-линз согласованного промежутка представлена на рис.9. Линзы имеют квадратную апертуру с размерами $76 \times 76 \text{ мм}^2$ и $99 \times 99 \text{ мм}^2$ соответственно.

На рис.10 представлено распределение градиента каждой из линз для значения тока $I = 2,0 \text{ кА}$. Поскольку величина отношения апертуры линз к ее длине различна для Ф- и Д-линз, то и характер изменения градиента вдоль их оси различен.

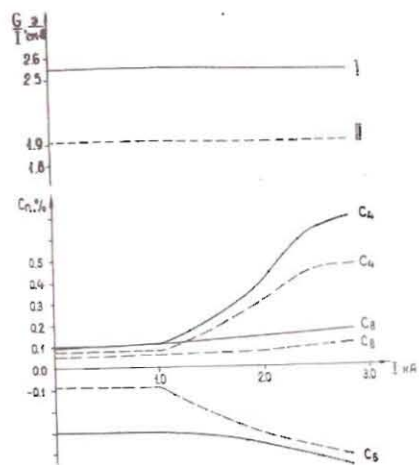


Рис.11. Распределение отношения G/I и распределение нелинейностей в центральной области квадруполов в зависимости от тока в СП обмотке: I - для линзы Φ , II - для линзы D .

Величины G , G/I , H_2 , C_n /на радиусе $r = 3,5$ см/ в зависимости от числа ампер-витков в СП обмотке для центрального поля Φ квадрупольного промежутка

	1,0 кА	2,0 кА	2,4 кА	2,8 кА
G , Гс/см	2550,31	5067,48	6067,48	7072,17
G/I , Гс/сма	2,550	2,534	2,528	2,527
H_2 , Гс	8926,08	17736,18	21236,16	24769,78
C_4 , %	0,08	0,32	0,44	0,48
C_6 , %	-0,09	-0,32	-0,37	-0,42
C_8 , %	0,06	0,08	0,09	0,11

На рис.11 представлено распределение величины G/I для каждой из линз, а также распределение нелинейностей для центральной области в зависимости от изменения тока в обмотке. Рис.11 дополняют табл.9 для линзы Φ и табл.10 - для линзы D . Как видно из таблиц, нелинейность градиента для линзы Φ составляет ~0,9%, а для линзы D ~1,1%. Амплитуды высших гармоник в центральной

Таблица 10 (MAGSYS)

Величины G , G/I , H_2 , C_n /на радиусе $r = 4,0$ см/ в зависимости от числа ампер-витков в СП обмотке для центрального поля квадрупольного промежутка

	1,0 кА	2,0 кА	2,4 кА	2,8 кА
G , Гс/см	1907,65	3790,63	4540,37	5289,49
G/I , Гс/сма	1,910	1,895	1,892	1,889
H_2 , Гс	7630,60	15162,52	18161,48	21157,96
C_4 , %	0,11	0,41	0,62	0,67
C_6 , %	-0,30	-0,37	-0,42	-0,47
C_8 , %	0,11	0,14	0,16	0,17

Таблица 11 (MAGSYS)

Эффективная длина СП квадруполов согласованного промежутка и интегральные величины $C_n /[\Phi]$ $r = 3,5$ см, $[D]$ $r = 4,0$ см/ в зависимости от числа ампер-витков СП обмотки

	1,0 кА	2,0 кА	2,4 кА	2,8 кА	
$L_{эф}$, см $[D]$	25,6	25,4	25,3	25,2	
$L_{эф}$, см $[\Phi]$	22,2	22,2	22,1	22,0	
C_4 , %	$[D]$	0,094	0,121	0,14	0,153
	$[\Phi]$	0,11	0,138	0,155	0,176
C_6 , %	$[D]$	0,41	0,299	0,25	0,187
	$[\Phi]$	0,57	0,48	0,41	0,38

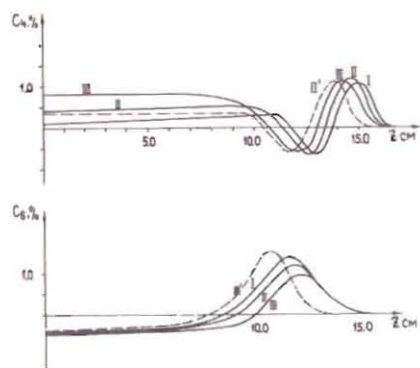


Рис.12. Распределение амплитуд относительных гармоник C_4 и C_6 вдоль оси линзы D согласованного промежутка: I соответствует току в СП обмотке 1,0 кА, II - 2,0 кА, III - 2,8 кА. Пунктиром отмечено аналогичное распределение для линзы Φ .

области возрастают, но по абсолютной величине при номинальном токе $I = 2,6$ кА составляют $0,4 \pm 0,7\%$ от основной для C_4 и $-0,4\%$ для C_6 . Амплитуда гармоники C_8 при всех значениях градиента $< 0,1\%$.

Распределение нелинейностей вдоль оси квадрупольей и в зависимости от величины тока в СП обмотке показано на рис.12. Распределение нелинейностей на торцах линз Φ и D носит идентичный характер. Результат численного интегрирования этих кривых представлен в табл.11. С увеличением тока величина интегральной амплитуды гармоники C_4 растет, но значение ее при номинальном токе $< 0,16\%$, величина интегральной амплитуды гармоники C_6 уменьшается. Величины интегральных амплитуд относительных гармоник для всех C_n , при $n \geq 8$ составляют менее $0,07\%$.

В табл.11 представлено также значение эффективных длин сверхпроводящих квадрупольей согласованного промежутка, полученное в результате численного интегрирования кривых, аналогичных представленным на рис.10 для различных значений тока в СП обмотке. Видно, что с ростом тока эффективная длина СП квадрупольей согласованного промежутка остается практически постоянной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с помощью системы программ MAGSYS для сверхпроводящего синхротрона ОИЯИ проведены исследования неоднородностей полей СП диполей и квадрупольей. Получены распределения эффективных длин в зависимости от тока в витке СП обмотки. Проведенные расчеты дали хорошее согласие с результатами измерений магнитных полей и нелинейностей при температуре жидкого гелия и при комнатной температуре и показали реальную возможность выбора параметров магнитных систем без построения промежуточных моделей магнитов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-83-582, Дубна, 1983.
2. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-82-383, Дубна, 1982.
3. Борисовская З.В., Ворожцов С.Б., Дударева Т.Н. ОИЯИ, Р9-83-304, Дубна, 1983.
4. Борисовская З.В., Ворожцов С.Б., Дударева Т.Н. ОИЯИ, Р9-81-304, Дубна, 1981.
5. Борисовская З.В. и др. ОИЯИ, Р9-81-63, Дубна, 1981.
6. Жидков Е.П. и др. ОИЯИ, Р9-81-12, Дубна, 1981.
7. Алфеев В.С. и др. ОИЯИ, Р9-81-339, Дубна, 1981.
8. Жидков Е.П. и др. ОИЯИ, Р9-82-384, Дубна, 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 июля 1984 года.

В Объединенном институте ядерных исследований начал выходить сборник "Краткие сообщения ОИЯИ". В нем будут помещаться статьи, содержащие оригинальные научные, научно-технические, методические и прикладные результаты, требующие срочной публикации. Будучи частью "Сообщений ОИЯИ", статьи, вошедшие в сборник, имеют /в отличие от препринтов/ статус официальных публикаций ОИЯИ.

Сборник "Краткие сообщения ОИЯИ" будет выходить регулярно.

The Joint Institute for Nuclear Research begins publishing a collection of papers entitled *JINR Rapid Communications* which is a section of the JINR Communications and is intended for the accelerated publication of important results on the following subjects:

Physics of elementary particles and atomic nuclei.
Theoretical physics.
Experimental techniques and methods.
Accelerators.
Cryogenics.
Computing mathematics and methods.
Solid state physics. Liquids.
Theory of condensed matter.
Applied researches.

Being a part of the JINR Communications, the articles of this new collection, in contrast to the JINR Preprints, have the status of official publications of the JINR.

JINR Rapid Communications will be issued regularly.



Борисовская Э.В. и др.
Трехмерный расчет элементов магнитной системы
сверхпроводящего синхротрона ОИЯИ

9-84-523

Для сверхпроводящего синхротрона ОИЯИ приводятся результаты численного моделирования элементов магнитной системы /дипольных магнитов, квадрупольных линз/ и анализа нелинейных эффектов при различных значениях тока в обмотке. Получены распределения эффективных длин диполей и квадруполь в зависимости от тока. Расчеты трехмерных магнитостатических полей проводились с помощью системы программ MAGSYS. Проведенные расчеты дали хорошее согласие / $2 \div 3 \cdot 10^{-3}$ / с результатами измерений магнитных полей и нелинейностей при температуре жидкого гелия и при комнатной температуре.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Borisovskaya Z.V. et al.
Three-Dimensional Simulation of Magnetic System
of JINR Superconducting Synchrotron

9-84-523

Results of numerical simulation of elements for a magnetic system (dipole magnets, quadrupole lenses) and analysis of nonlinear effects at different values of current in a coil are presented for a JINR superconducting synchrotron. Effective length distribution of the dipoles and quadrupoles versus current have been obtained. Three-dimensional magnetostatic fields have been calculated using a system of MAGSYS programs. The calculations are in good agreement / $2 \div 3 \cdot 10^{-3}$ / with results of measurements of magnetic fields and nonlinearities at liquid helium and room temperatures.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984