

81-12



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

C 345c + C 17d

Экз. чит. зал 81-12

1336/1-81

Е.П.Жидков, Р.В.Полякова, И.А.Шелаев,
И.П.Юдин

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ
ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ДВУМЕРНОГО
МАГНИТНОГО ПОЛЯ
В СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ ДИПОЛЕ

1981

P9-81-12

Жидков Е.П. и др.

Численные эксперименты по моделированию двумерного магнитного поля в сверхпроводящем диполе

Исследуется точность численного моделирования сверхпроводящего диполя с прямоугольной апертурой методом отраженных токов и конечно-разностным методом. Для численного расчета конечно-разностным методом использовалась система программ POISSON. Проведенные численные эксперименты позволяют сделать следующие выводы.

1) Для СП синхротронного диполя с прямоугольной апертурой возможно для $B = 0,5 \div 1,8$ Т создание высокооднородного ($\Delta H/H \sim 1 \cdot 10^{-4}$) магнитного поля в $\sim 70\%$ размеров апертуры. При этом допуски на параметры, ответственные за однородность поля 10^{-4} , составляют $\pm 0,01$ мм.

2) Расчеты нелинейностей поля с помощью системы программ POISSON можно проводить с точностью 10^{-4} для индукций $B < 1,8$ Т. Эта же точность характерна и для расчетов по методу отраженных токов. При $B = 2,6$ Т точность вычислений снижается до 10^{-3} .

3) При индукциях $B = 2,6$ Т нелинейные эффекты проявляют себя заметным образом. В частности, относительные амплитуды третьей и пятой гармоник составляют соответственно 2,8% и 0,4% от первой.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1981

Zhidkov E.P. et al.

P9-81-12

Numerical Experiments on Simulation of Two-Dimensional Magnetic Field in a Superconducting Dipole

A numerical simulation accuracy of a superconducting dipole with rectangular aperture is studied by the image current method and the finite-difference method. For the numerical calculations by the finite-difference method the POISSON set of programs is used. The performed numerical experiments permit to draw the following conclusions:

1) For superconducting synchrotron dipole with rectangular aperture the creation of high-homogeneous ($\Delta H/H \sim 1 \cdot 10^{-4}$) magnetic fields in a 70% measuring aperture is possible for $B = 0.5 \div 1.8$ T the tolerances on the responsible for field homogeneity 10^{-4} parameters are equal to 0.01 mm; 2) the field non-linear calculation by the POISSON program set is possible to perform for induction of ≤ 1.8 T by the accuracy 10^{-4} . The same accuracy is characteristic for calculations by the image current method.

The calculation accuracy is reduced to 10^{-3} by 2.6 T. 3) The non-linear effects manifest themselves noticeably. In particular, the amplitudes of the third and fifth harmonics are equal to 2.8% and 0.4%, respectively, from the first one.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1981

I. В данной работе проведено сравнение двух методов моделирования двумерного магнитного поля в сверхпроводящем (СП) диполе с прямоугольной апертурой:

- 1) конечно-разностного метода (система программ POISSON /1,2/ и
- 2) метода токовых отображений /3/ (программа MIC2).

Целью работы является исследование возможности получения высокооднородного ($\Delta B/B \sim 10^{-4}$) магнитного поля, оценка точности расчетов используемыми методами, а также исследование нелинейных эффектов при полях до 2,6 Т.

Сравнение двух методов проведено на примере расчета СП магнита регулярного периода сверхпроводящего синхротрона-инжектора на 1,5 ГэВ по протонам /4/. Конфигурация поперечного сечения рассматриваемого СП диполя показана на рис. I.

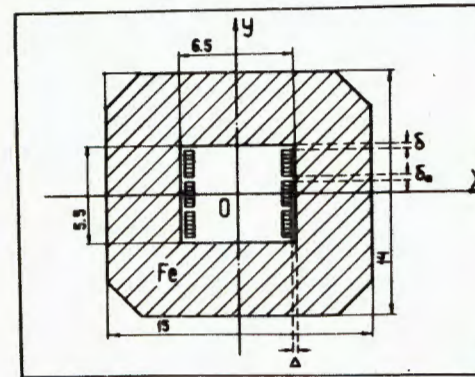


Рис. I.

Конфигурация СП диполя. Размеры даны в [см].

Железный экран рассматриваемого магнита изготовлен из стали Fe + 3,25%Si. На рис.2 и в табл.1 для этого материала приведена зависимость магнитной проницаемости μ от величины магнитной индукции B для температур T=300 К и T=4,2 К^{5/}.

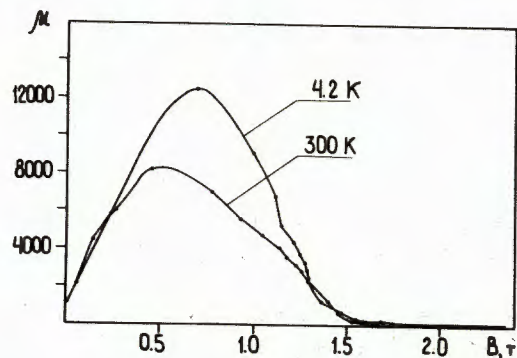


Рис.2.

Зависимость магнитной проницаемости μ от величины магнитной индукции B для температур T=300 К и T=4,2 К.

Расчетные формулы и методика расчетов изложены для конечно-разностного метода в работе^{6/}, а для метода отраженных токов - в работе^{3/}, поэтому в дальнейшем приводятся лишь результаты численных экспериментов. Как видно из табл.2, величины неоднородностей

$c_n = v_n/v_1$, где v_n - амплитуда n-ой гармоники, являются почти линейными функциями величины корпусной изоляции δ (см. рис.1). Во всяком случае, для $\mu = \infty$, как можно видеть из табл.2, неоднородности c_n создаются именно корпусной изоляцией и при $\delta \rightarrow 0$ ($\delta_0 = 0$) все $c_n \rightarrow 0$. Для реального случая $\mu = \mu(B)$ $c_n \neq 0$ при $\delta = \delta_0 = 0$ в силу нелинейной зависимости $\mu = \mu(B)$. Однако и здесь ($B < 1,8$ Т) $|c_n| < 1,5 \cdot 10^{-4}$.

Поскольку корпусная изоляция δ в реальном магните необходима, то неоднородности c_n будут присутствовать неизбежно.

В работе^{3/} была предложена методика компенсации третьей и пятой гармоник, создаваемых величиной δ , с помощью дополнительной изоляционной прокладки δ_0 (см. рис.1), помещенной между 7 и 8 витками обмотки (всего в полуобмотке 24 витка), считая от центра магнита. На рис.3а в приближении $\mu = \infty$ (рис2) приведена зависимость c_3 и c_5 на радиусе $r = 2,5$ см от величины δ_0 при $\delta = 0,5$ мм для случаев, когда компенсирующая прокладка δ_0 помещена после 6-го витка (VI), после 7-го (VII) и после 8-го (VIII). Кроме того, для

Таблица I. Зависимость $\mu = \mu(B)$ для железа Fe+3,25%Si при температурах T=4,2К и T=300К.

T=4,2К		T=300К	
μ	B, T	μ	B, T
700	0,	1150	0,0075
2150	0,0595	2120	0,0600
5800	0,232	4450	0,14
12500	0,687	6000	0,26
9130	0,995	8160	0,45
6800	1,11	7000	0,77
5250	1,14	5560	0,92
4400	1,21	4740	1,04
3760	1,24	4110	1,13
3300	1,27	3540	1,17
2900	1,28	3160	1,22
2460	1,29	2840	1,25
1230	1,36	2350	1,29
684	1,47	1270	1,40
280	1,55	655	1,44
153	1,68	278	1,53
106	1,75	151	1,66
82,5	1,81	106	1,75
67	1,85	82,5	1,81
37	2,03	67,5	1,86
25	2,06		
19	2,10		
13	2,15		
8,8	2,50		
5,6	2,7		
4,2	2,9		
3,3	3,2		
2,7	3,5		
2,4	3,8		
2,0	4,2		
1,6	5,2		
1,4	6,0		
1,2	6,8		
1,001	8,0		

Таблица 2. Величины v_1 и c_n [на радиусе $r = 2,5$ см], рассчитанные методом отраженных токов (MIC2) и с помощью системы программ POISSON. Число ампер-витков полной обмотки $nI = 48 \cdot 500$ А.

		POISSON		MIC2
		$\mu = \mu(B)$	$\mu = \infty$	$\mu = \infty$
$\delta = 0$	$\delta_0 = 0$			
	B_I, T	0,54813	0,54835	0,54704
	$C_3, \%$	0,015	0,000	0,000
	$C_5, \%$	0,001	0,000	0,000
	$C_7, \%$	0,002	0,001	0,000
	$C_9, \%$	-0,000	0,001	0,000
$C_{II}, \%$	0,002	0,000	0,000	
$\delta = 0,1$	$\delta_0 = 0$			
	B_I, T	0,54788	0,54810	0,54734
	$C_3, \%$	0,130	0,117	0,138
	$C_5, \%$	0,130	0,128	0,063
	$C_7, \%$	-0,022	-0,022	-0,009
	$C_9, \%$	-0,025	-0,023	-0,009
$C_{II}, \%$	0,016	0,013	0,001	
$\delta = 0,5$	$\delta_0 = 0$			
	B_I, T	0,54917	0,54939	0,54817
	$C_3, \%$	0,731	0,717	0,701
	$C_5, \%$	0,324	0,323	0,321
	$C_7, \%$	-0,039	-0,041	-0,045
	$C_9, \%$	-0,057	-0,054	-0,044
$C_{II}, \%$	0,063	0,059	0,004	
$\delta = 0,8$	$\delta_0 = 0,8$			
	B_I, T	0,54814	0,54836	0,54797
	$C_3, \%$	-0,000	-0,014	-0,015
	$C_5, \%$	-0,016	-0,016	-0,026
	$C_7, \%$	0,135	0,134	0,110
	$C_9, \%$	0,265	0,266	0,273
$C_{II}, \%$	0,079	0,078	0,285	

этих трех случаев на рис.3а приведена линия узлов $C_3 = C_5$ для различных δ как функция величин δ и δ_0 , откуда видно, что помещение компенсирующей прокладки δ_0 между 7 и 8 витками (УП) является оптимальным. При этом получение малых C_3 и C_5 сводится к подбору для данного δ такого δ_0 , чтобы только $C_3 = 0$. При этом C_5 мало, но не равно нулю.

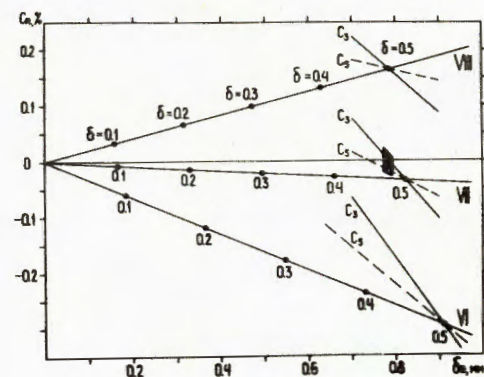


Рис.3 а

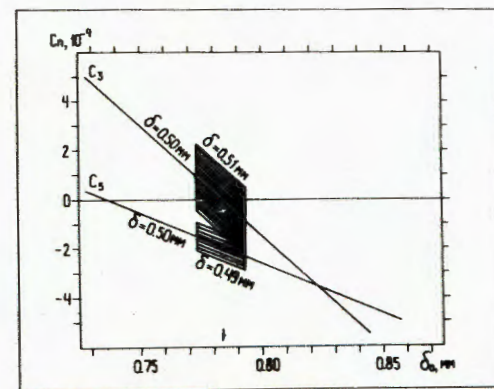


Рис.3 б

Величины C_3 и C_5 на радиусе $r = 2,5$ см как функции от δ_0 [$\delta = 0,5$ мм]. Жирными линиями выделены допуски, равные $\pm 0,01$ мм, на параметры δ и δ_0 .

На рис.3б для случая (УП) $\delta = 0,5$ мм и $\delta_0 = 0,783$ мм приведены допуски на величины c_3 и c_5 при $\Delta\delta = \pm 0,01$ мм и $\Delta\delta_0 = \pm 0,01$ мм. Из этого рисунка видно, что максимальные значения $|c_{3,\max}| = 2,2 \cdot 10^{-4}$, а $|c_{5,\max}| = 2,8 \cdot 10^{-4}$ (на радиусе $r = 2,5$ см).

На рис.4 показаны (POISSON, $\mu = \mu(B)$, $T=4,2K$) величины суммарной неоднородности $\Delta v/v_1$ в зависимости от x при $y=0$ и $\Delta v/v_1$ от y при $x=0$ для диполей с параметрами I) $\delta = 0,5$ мм, $\delta_0 = 0$ и II) $\delta = 0,5$ мм, $\delta_0 = 0,8$ мм (УП). Стрелкой на рис.4 обозначена граница области апертуры, внутри которой $\Delta v/v_1 < 1 \cdot 10^{-4}$. Для диполя I радиус этой области $r_I = 0,34$ см; для диполя II $r_{II} = 1,8$ см, т.е. компенсация третьей и пятой гармоник приводит к увеличению радиуса области однородности $\Delta v/v_1 < 1 \cdot 10^{-4}$ более чем в 5 раз.

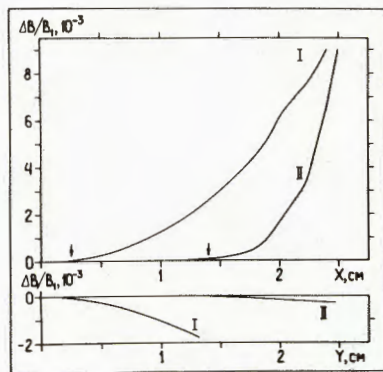


Рис.4.

Величины $\Delta v/v_1$ в зависимости от x при $y=0$ и $\Delta v/v_1$ от y при $x=0$ для диполей I ($\delta = 0,5$ мм, $\delta_0 = 0$) и II ($\delta = 0,5$ мм, $\delta_0 = 0,8$ мм после 7-го витка).

2. Для оценки точности используемых методов были проделаны следующие тесты при индукции 0,5 Т.

I) Из физических соображений расчеты с $\delta = \delta_0 = 0$ и $\mu = \infty$ должны давать все $c_n = 0$. Из табл.2 видно, что расчеты по программе MISC2 этому условию удовлетворяют с точностью $4 \cdot 10^{-6}$ для c_3 и лучше $5 \cdot 10^{-8}$ для остальных c_n [число отражений $N_x = N_y = 16$, см. работу^{3/}], а по программе POISSON - лучше $1 \cdot 10^{-5}$ для всех c_n . Из табл.2 видно также, что расчеты для $\mu = \mu(B)$ ($T=4,2K$) приводят к уве-

личению c_3 на $1,5 \cdot 10^{-4}$, остальные c_n увеличиваются не более, чем на $2 \cdot 10^{-5}$.

2) Для конечно-разностного метода в табл.3 для диполя II ($\delta = 0,5$ мм и $\delta_0 = 0,8$ мм) приведено сравнение результатов расчетов с крупной сеткой (число элементов разбиения на 1/4 диполя равно 323) и с сеткой в 2 раза мельче (число элементов разбиения на 1/4 диполя равно 116). Заметим, что для ЭВМ типа CDC-6500 OIЯИ система программ POISSON допускает максимально возможное число элементов разбиения, равное 1135. Из табл. 3 видно, что точность вычисления гармоник поля для мелкой и крупной сеток составляет примерно 10^{-4} . Эта точность сохраняется при полях 0,5т+ 1,8 Т.

3) В работе^{3/} было показано, что при проведении гармонического анализа магнитного поля для определения относительных амплитуд гармоник c_n с точностью лучше 10^{-4} необходимо брать не менее $N_T = 40$ точек на окружности. В настоящей работе все результаты были получены именно с $N_T = 40$.

В табл.4 (POISSON) показано влияние радиуса, на котором определяются амплитуды c_n , на их величины. Проведенное сравнение показывает, что расчет c_n на радиусах от $r_0 = 1,5$ см до $r_0 = 2,0$ см имеет небольшой разброс: 10^{-6} для c_3 и $\sim 10^{-4}$ для остальных c_n . Увеличение разброса Δc_n для меньших радиусов вызывается тем, что внутри одного элемента расчетной сетки попадает более одной точки, в которой вычисляется поле. Здесь точность определения c_n в значительной мере зависит от способа пересчета значения поля из узлов сетки внутрь элемента сетки. При увеличении радиуса r_0 от 2,0 см до 2,5 см наблюдаемое увеличение разброса c_n объясняется близостью узлов сетки, расположенных внутри токовой обмотки.

В настоящей работе на основании исследования, приведенного в табл.4, выбран оптимальный радиус $r_0 = 1,8$ см (что составляет 2/3 размеров апертуры), на котором впоследствии проводился гармонический анализ. Результаты затем пересчитывались на радиус $r = 2,5$ см.

Табл. 4 показывает, что учет реальной зависимости $\mu = \mu(B)$ [$T=4,2K$ и $T=300K$] при малых индукциях $v < 1,8$ т изменяет (по сравнению с $\mu = \infty$) только c_3 (на $1 \cdot 10^{-4}$), не влияя на остальные гармоники.

3. Для СП диполей I и II на рис. 5 и в табл. 5 приведено поведение величин v_1 и c_n для значений тока в одном витке СП обмотки от $I=500A$ до $I=2,5KA$. Как видно из рис.5, функция $v_1 = v_1(I)$ становится нелинейной, а величины $c_n = c_n(I)$ перестают быть константами при токе в СП обмотке $I > 1,8$ кА, т.е. высокооднородном поле в СП диполе II будет для интервала $v=0,0 \div 1,8$ Т. Таким образом, нелинейные эффекты начинают себя проявлять лишь тогда, когда пучок, проходящий

внутри апертуры СП диполя, будет существенно сжат. Заметим, что на рис.5 и в табл.5 величины C_n приведены по-прежнему для $r=2,5$ см.

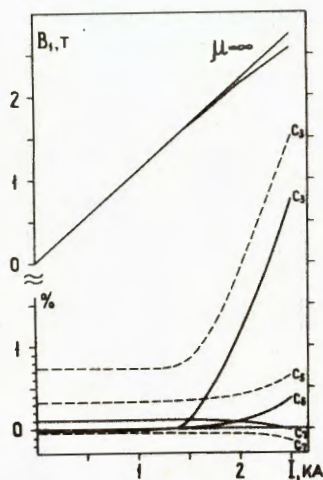


Рис.5.

Величины V_1 , C_3 , C_5 и C_7 на [радиусе $r = 2,5$ см] в зависимости от тока в витке СП обмотки. Сплошная линия - для диполя II, штриховая - для диполя I.

Таблица 3. Сравнение величин V_1 и C_n (%) [на радиусе $r=2,5$ см], вычисленных на крупной (I) и мелкой (II) сетках. СП диполь II ($\delta = 0,5$ мм, $d_0 = 0,8$ мм). Число ампервитков полной обмотки $nI = 48 \cdot 500$.

	$\mu = \mu(B)$		$\mu = \infty$	
	I	II	I	II
$V_{I, T}$	0,54812	0,54813	0,54833	0,54835
C_3	$-6,70 \cdot 10^{-5}$	$7,05 \cdot 10^{-4}$	$-2,05 \cdot 10^{-4}$	$-1,33 \cdot 10^{-4}$
C_5	$-3,28 \cdot 10^{-4}$	$-2,42 \cdot 10^{-4}$	$-3,41 \cdot 10^{-4}$	$-2,47 \cdot 10^{-4}$
C_7	$9,00 \cdot 10^{-5}$	$7,71 \cdot 10^{-4}$	$8,03 \cdot 10^{-5}$	$7,64 \cdot 10^{-4}$
C_9	$9,66 \cdot 10^{-4}$	$1,80 \cdot 10^{-3}$	$9,77 \cdot 10^{-4}$	$1,81 \cdot 10^{-3}$
C_{II}	$1,37 \cdot 10^{-3}$	$1,63 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,63 \cdot 10^{-3}$
C_{I3}	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-3}$

Таблица 4. Разброс величин V_1 и C_n [пересчитанных на радиус $r = 2,5$ см] в зависимости от вычисления их на разных радиусах r_0 . СП диполь II, POISSON, $nI=48 \cdot 500$ А.

$V_{I, T}$ C_3 C_5 C_7 C_9 C_{II}	$r_0 = 1,0$ см	$r_0 = 1,5$ см	$r_0 = 1,8$ см	$r_0 = 2$ см	$r_0 = 2,5$ см	$C_{n, min}$	$C_{n, max}$	ΔC_n
$V_{I, T}$	0,54814	0,54814	0,54814	0,54814	0,54815	0,54814	0,54815	$1,82 \cdot 10^{-5}$
C_3	$1,63 \cdot 10^{-7}$	$-3,45 \cdot 10^{-7}$	$-2,21 \cdot 10^{-6}$	$-1,73 \cdot 10^{-6}$	$3,37 \cdot 10^{-5}$	$-2,21 \cdot 10^{-6}$	$3,37 \cdot 10^{-5}$	$3,59 \cdot 10^{-5}$
C_5	$-3,30 \cdot 10^{-6}$	$-1,85 \cdot 10^{-5}$	$-1,57 \cdot 10^{-4}$	$-7,00 \cdot 10^{-5}$	$-2,34 \cdot 10^{-4}$	$-2,34 \cdot 10^{-4}$	$-3,30 \cdot 10^{-6}$	$2,31 \cdot 10^{-4}$
C_7	$6,02 \cdot 10^{-6}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$3,37 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-3}$	$6,02 \cdot 10^{-6}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$
C_9	$2,00 \cdot 10^{-6}$	$4,75 \cdot 10^{-5}$	$2,65 \cdot 10^{-3}$	$4,24 \cdot 10^{-4}$	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-6}$	$2,65 \cdot 10^{-3}$	$2,65 \cdot 10^{-3}$
C_{II}	$-4,80 \cdot 10^{-7}$	$-1,69 \cdot 10^{-6}$	$7,93 \cdot 10^{-4}$	$1,34 \cdot 10^{-4}$	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$-1,69 \cdot 10^{-6}$	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$1,91 \cdot 10^{-3}$
$V_{I, T}$	0,54836	0,54836	0,54836	0,54836	0,54838	0,54836	0,54838	$3,64 \cdot 10^{-5}$
C_3	$-2,24 \cdot 10^{-5}$	$-5,10 \cdot 10^{-5}$	$-1,43 \cdot 10^{-4}$	$-9,17 \cdot 10^{-5}$	$-1,07 \cdot 10^{-4}$	$-1,43 \cdot 10^{-4}$	$-2,24 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-4}$
C_5	$-3,51 \cdot 10^{-6}$	$-1,92 \cdot 10^{-5}$	$-1,61 \cdot 10^{-4}$	$-7,17 \cdot 10^{-5}$	$-2,37 \cdot 10^{-4}$	$-2,37 \cdot 10^{-4}$	$-3,51 \cdot 10^{-6}$	$2,33 \cdot 10^{-4}$
C_7	$5,90 \cdot 10^{-6}$	$6,52 \cdot 10^{-5}$	$1,34 \cdot 10^{-3}$	$3,34 \cdot 10^{-4}$	$9,91 \cdot 10^{-4}$	$5,90 \cdot 10^{-6}$	$1,34 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$
C_9	$1,98 \cdot 10^{-6}$	$4,75 \cdot 10^{-5}$	$2,66 \cdot 10^{-3}$	$4,26 \cdot 10^{-4}$	$2,20 \cdot 10^{-3}$	$1,98 \cdot 10^{-6}$	$2,66 \cdot 10^{-3}$	$2,66 \cdot 10^{-3}$
C_{II}	$-4,83 \cdot 10^{-7}$	$-1,76 \cdot 10^{-6}$	$7,80 \cdot 10^{-4}$	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$1,90 \cdot 10^{-3}$	$-1,76 \cdot 10^{-6}$	$1,90 \cdot 10^{-3}$	$1,90 \cdot 10^{-3}$

Таблица 5. Величины v_1 и c_n (%) [на радиусе $r = 2,5$ см] в зависимости от тока I в витке СП обмотки. POISSON, $r_0 = 1,8$ см.

		500A	1000A	1500A	2000A	2500A
СП диполь I	B_I, T	0,54917	1,0984	1,6445	2,1498	2,5870
	$C_3, \%$	0,731	0,728	0,833	1,882	3,527
	$C_5, \%$	0,324	0,328	0,342	0,411	0,656
	$C_7, \%$	-0,039	-0,041	-0,044	-0,063	-0,133
	$C_9, \%$	-0,057	-0,056	-0,062	-0,122	-0,219
	$C_{11}, \%$	0,063	0,061	0,071	0,175	0,328
	$C_{13}, \%$	0,165	0,174	0,182	0,191	0,401
СП диполь II	B_I, T	0,54814	1,0963	1,6412	2,1443	2,5796
	$C_3, \%$	-0,000	-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
	$C_9, \%$	0,265	0,266	0,264	0,277	0,244
	$C_{11}, \%$	0,079	0,078	0,081	0,056	0,125
	$C_{13}, \%$	-0,406	-0,401	-0,375	-0,176	0,273

Для полученных (POISSON) при $I > 1$, кА результатов было проведено исследование точности. В табл. 5 для СП диполя II представлены результаты, полученные при расчетах с мелкой сеткой (число элементов разбиения равно 1135). В дополнение к этому для $I = 2,5$ кА величины v_1 и c_n вычислялись на крупной сетке (число элементов разбиения равно 323). При этом $v_1 = 2,5940$ Т, $c_3 = 2,359\%$, $c_5 = 0,730\%$, $c_7 = -0,138\%$, $c_9 = 0,156\%$, $c_{11} = 0,0134\%$.

Таким образом, приведенные выше результаты численных экспериментов позволяют сделать следующее заключение.

1) Для СП синхротронного диполя с прямоугольной апертурой возможно для $v = 0,5 \div 1,8$ Т создание высокооднородного ($\Delta H/H \sim 1 \cdot 10^{-4}$) магнитного поля в 70% размеров апертуры. При этом допуски на параметры δ и δ_0 , ответственные за однородность поля 10^{-4} , таковы: $\Delta \delta$ и $\Delta \delta_0 = \pm 0,01$ мм.

2) Расчеты нелинейностей поля с помощью системы программ POISSON можно проводить с точностью 10^{-4} для индукций $v < 1,8$ Т. Эта же точность характерна и для расчетов по методу отраженных токов. При $v \approx 2,6$ Т точность вычислений снижается до 10^{-3} .

3) При индукциях $v \approx 2,6$ Т нелинейные эффекты проявляют себя заметным образом. В частности, относительные амплитуды третьей и пятой гармоник составляют соответственно 2,8% и 0,4% от первой.

Измеренное поле изготовленного диполя II показывает, что действительно, при $v \approx 0,5$ Т в 70% размеров апертуры создается однородность поля $\Delta H/H = 1 \cdot 10^{-4}$.

Литература

1. POISSON Group Programs. User's Guide, CERN, 1975.
2. Ворожцов С.Б., Дударева Т.Н., Полякова Р.В., Сергеева Н.В. POISSON - система программ по расчету, анализу и оптимизации магнитостатических и электростатических полей. БИ-II-12070, ОИЯИ, Дубна, 1978.
3. Шелаев И.А., Юдин И.П. ОИЯИ, Р9-80-333, Дубна, 1980.
4. Шелаев И.А., Юдин И.П. ОИЯИ, 9-12346, Дубна, 1979 г.
5. Mc Inturff A. and Clauss J., Proc. of 3rd Int. Conf. Magnet Technol., Hamburg, 1970, p. 45.
6. Жидков Е.П., Полякова Р.В., Шелаев И.А. ОИЯИ, РII-12324, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 января 1981 года.