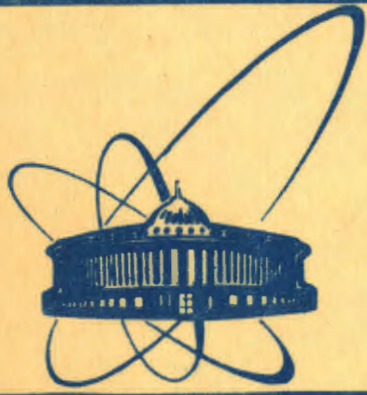


2/IV-84



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

1639/84

P11-83-893

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

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДВУМЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
З Т СП ДИПОЛЯ С ЖЕЛЕЗОМ**

1983

Важным направлением исследований, проводимых в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ в области применения сверхпроводимости (СП) в ускорительной технике, является создание магнитных элементов с прямоугольной апертурой, в которых магнитное поле формируется СП обмоткой и близко расположенным железным сердечником^{/1-3/}. Разрабатываемые в ЛВЭ ОИЯИ СП магнитные системы предназначены для получения опыта создания СП ускорителя^{/4/}, необходимого для подготовки технического проекта нуклотрона^{/5/}.

В настоящей работе обращается внимание на теоретически предложенную в работе^{/6/} конфигурацию диполя, в которой величина поля в апертуре магнита может достигать 3 Т, в то время как магнитная индукция в железном сердечнике не превосходит величины 2,1 Т. Магнит такой конфигурации вызывает интерес тем, что наряду с сохранением технологии его изготовления, близкой с технологией обычного "теплого" магнита, здесь возможно получить поля в $\sqrt{2}$ раза выше.

Целью настоящей работы является:

1) численное исследование возможности получения технологически приемлемой конфигурации СП диполя, обеспечивающей достаточно высоко-однородное поле на уровне 3 Т;

2) получение зависимостей нелинейностей поля C_n ^{/2/} от величины индукции B , т.е. $C_n = f(B)$;

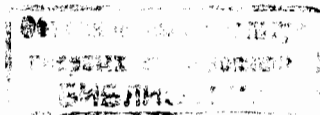
3) сравнение двух типов СП диполей с прямоугольной апертурой:

а) СП диполя D_1 (см. рис.1), исследованного в работах^{/1-3/} и
б) новой конфигурации - СП диполей D_2 , D_3 и D_4 (см. рис.2, рис.3 и рис.4 а,б; размеры даны в см);

4) сравнение двух методов моделирования двумерного магнитного поля в полученной конфигурации СП диполя с прямоугольной апертурой:

а) конечно-разностного метода (система программ POISSON^{/7,8/}) и
б) метода токовых отображений^{/1/} (программа MISC2M).

Диполь D_2 - назовем его "идеальным" диполем - это два наложенных друг на друга диполя D_1 без зазоров между обмоткой и железом. Для исследования роли электрической изоляции между обмоткой и желе-



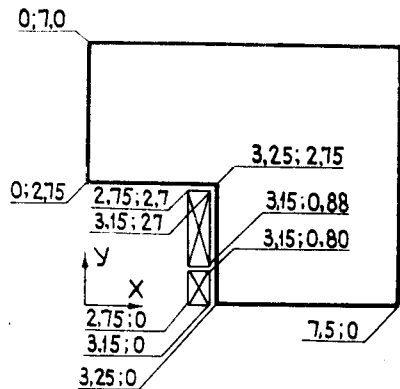


Рис. 1. Поперечное сечение 1/4 СП диполя D_1

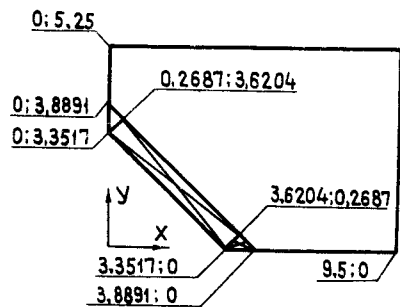


Рис. 2. Поперечное сечение 1/4 СП диполя D_2

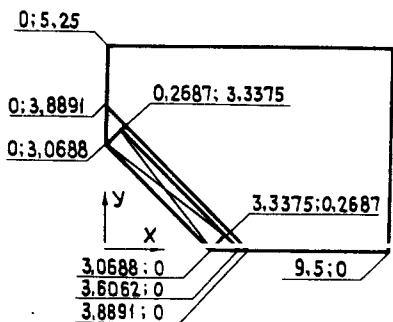


Рис. 3. Поперечное сечение 1/4 СП диполя D_3

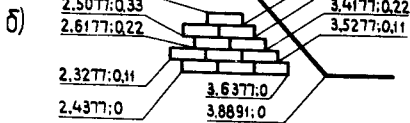
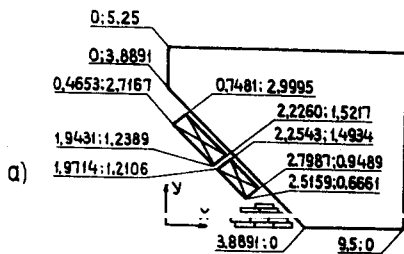


Рис. 4. а) Поперечное сечение 1/4 СП диполя D_4 .
б) Сечение нижней части СП обмотки диполя D_4

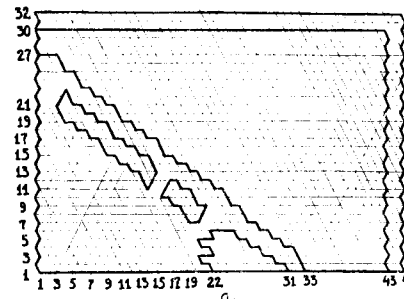
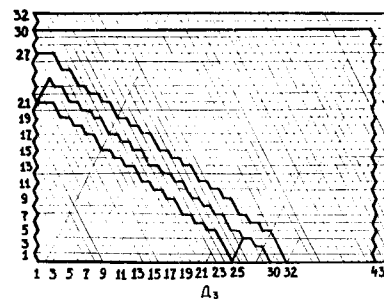
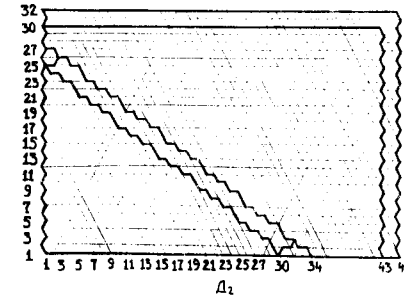
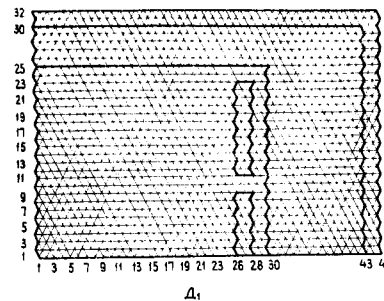


Рис. 5. Логические диаграммы СП диполей $D_1, 2, 3, 4$.

На рис. 5 представлены логические диаграммы для проведения численного моделирования магнитных полей СП диполей D_1, D_2, D_3 и D_4 конечно-разностным методом (POISSON). Фотографии с дисплея расчетной сетки для диполей D_2 и D_4 представлены на рис. 6.

Результаты численного моделирования диполя D_1 для интервала тока в витке I от 500 до 2500 А приведены в табл. 5 работы [2]. Для диполей D_2, D_3 и D_4 эти результаты приведены в таблице I и на рис. 7-13.

На рис. 7 для диполей $D_1, 2, 3, 4$ показана зависимость индукции B в центре апертуры от тока I в СП витке для интервала $I=(0+2,5 \text{ кА})$. Видны преимущества диполей $D_2, 3, 4$ по сравнению с диполем D_1 : величина индукции на всем интервале тока для $D_2, 3, 4$ в $\sqrt{2}$ раза больше, чем для D_1 .

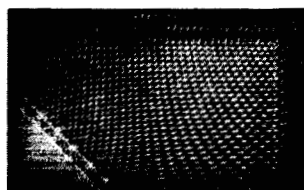
На рис. 8 показана зависимость относительной амплитуды поля C_3 как функция тока I в витке СП диполей $D_1, 2, 3, 4$. Видно, что насыщение железного сердечника начинает сказываться при $I > 1,5 \text{ кА}$. Наиболее наглядно преимущества диполей $D_2, 3, 4$ по сравнению с диполем D_1 показаны на рис. 9: зависимость $C_3 = f(B_1)$. Если для D_1 относительная амплитуда третьей гармоники поля C_3 начинает возрастать при $B > 1,5 \text{ Т}$, то для $D_2, 3, 4$ этот процесс начинается лишь после 2,1 Т.

зом на однородность поля рассматривался диполь D_3 . И, наконец, полностью технологически приемлемый вариант - диполь D_4 , в котором нет области с двойной плотностью тока, т.е. в токовых областях плотность тока одна и та же. Отметим, что если для диполя D_1 количество витков в полуапертуре было 24, то для D_4 эта величина равна 37. Размеры витка $0,4 \times 0,11 \text{ см}^2$.

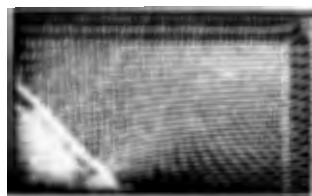
Таблица I

Величины $V_I(T)$ и C_n (%) на радиусе $r = 2,0$ см в зависимости от тока I в витке СП обмотки диполей D_2, D_3, D_4

| | | I=500 A | I000 A | I500 A | 2000 A | 2500 A |
|----------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| D ₂ | V _I , T | 0,7714 | 1,5427 | 2,3002 | 2,9595 | 3,4924 |
| | C ₃ | 0,029 | 0,023 | -0,243 | -1,719 | -3,592 |
| | C ₅ | 0,025 | 0,023 | -0,029 | -0,213 | -0,305 |
| | C ₇ | -0,003 | -0,003 | -0,016 | -0,070 | -0,118 |
| | C ₉ | 0,005 | 0,005 | 0,001 | -0,003 | -0,007 |
| | C ₁₁ | -0,008 | -0,008 | -0,003 | -0,005 | -0,007 |
| | C ₁₃ | 0,006 | 0,008 | 0,053 | 0,240 | 0,406 |
| D ₃ | V _I , T | 0,7238 | 1,4476 | 2,1692 | 2,8538 | 3,4291 |
| | C ₃ | -3,035 | -3,039 | -3,080 | -3,595 | -5,104 |
| | C ₅ | -0,539 | -0,540 | -0,539 | -0,557 | -0,538 |
| | C ₇ | -0,234 | -0,234 | -0,236 | -0,257 | -0,291 |
| | C ₉ | -0,025 | -0,025 | -0,024 | -0,033 | -0,011 |
| | C ₁₁ | -0,012 | -0,012 | -0,013 | 0,018 | -0,030 |
| | C ₁₃ | 0,854 | 0,855 | 0,863 | 0,986 | 1,060 |
| D ₄ | V _I , T | 0,7305 | 1,4609 | 2,1970 | 2,8605 | 3,4493 |
| | C ₃ | 0,0268 | 0,0233 | 0,0085 | -0,3474 | -1,6478 |
| | C ₅ | -0,0680 | -0,0682 | -0,0556 | 0,0663 | 0,1536 |
| | C ₇ | 2,1077 | 2,1074 | 2,0994 | 2,0522 | 2,0885 |
| | C ₉ | 0,4004 | 0,4005 | 0,4055 | 0,4229 | 0,4725 |
| | C ₁₁ | 0,3811 | 0,3810 | 0,3784 | 0,3777 | 0,3756 |
| | C ₁₃ | -1,0997 | -1,0995 | -1,0943 | -1,0624 | -1,0777 |



D₂



D₄

Рис.6. Расчетные сетки для моделирования магнитного поля СП диполей D₂ и D₄ (фотографии с дисплея)

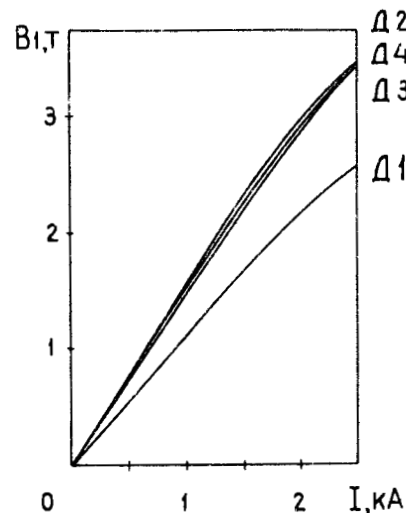


Рис.7. Зависимость величины магнитной индукции V_I от тока в витке СП обмотки для диполей $D_1, 2, 3, 4$.

Рис.8. Величина C_n на радиусе $\sim 90\%$ размеров апертуры ($r = 2,5$ см для D_1 и $r = 2,0$ см для $D_2, 3, 4$) в зависимости от тока I в витке СП обмотки для диполей $D_1, 2, 3, 4$.

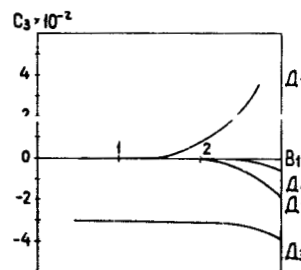
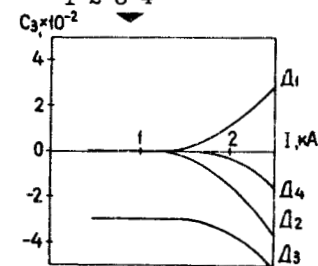


Рис.9. Величина C_n на радиусе $\sim 90\%$ размеров апертуры в зависимости от индукции V_I для диполей $D_1, 2, 3, 4$.

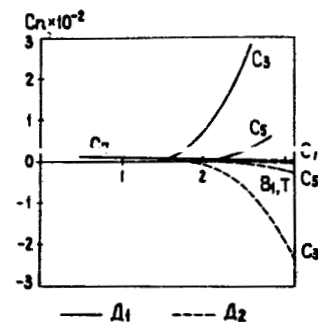


Рис.10. Зависимость величин C_n ($n = 3, 5, 7$) на радиусе $\sim 90\%$ размеров апертуры от индукции V_I для диполей D_1 и D_2 .

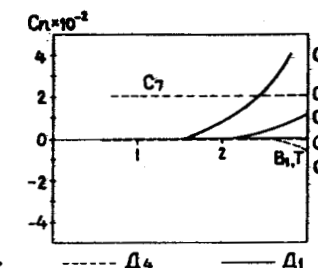


Рис.11. Зависимость величин C_n ($n = 3, 5, 7$) на радиусе $\sim 90\%$ размеров апертуры от индукции V_I для диполей D_1 и D_4 .

Полная картина зависимостей $C_n = f(V_1)$ для $n=3,5$ и 7 при сравнении диполя D_1 и "идеального" диполя новой конфигурации D_2 , а также D_1 и D_4 приведена на рис. 10, 11. Медленный рост амплитуд C_n для новой конфигурации (диполи $D_{2,3,4}$) объясняется тем, что геометрия этих магнитов позволяет создавать индукцию в железном сердечнике в $\sqrt{2}$ раза меньшую, чем в апертуре магнита, т.е. на границе с железом проявляется не полный вектор индукции в апертуре, а его компоненты, что наглядно видно из картины силовых линий двумерного магнитного поля этих диполей (см. рис. 12, 13).

Изложенные выше результаты получены с помощью программы POISSON. Для сравнения в таблице 2 приведены результаты гармонического анализа магнитного поля СП диполя D_4 по методу токовых отображений I/I (программа MIC2M) для тока в витке СП обмотки $I=500$ А. Здесь же, в таблице 2, для $I=500$ А приведены результаты расчетов по программе MIC2M для безжелезного варианта СП диполя D_4 , т.е. диполя, лишенного железного сердечника.

Таким образом, результаты проведенных численных экспериментов позволяют сделать следующие выводы:

Для технологически осуществимого СП диполя с прямоугольной апертурой возможно создание высокооднородного магнитного поля в 90% размеров апертуры для индукций $B = 0+3$ Т. Нелинейные эффекты при $B=3$ Т достигают 3%; относительные амплитуды третьей и пятой гармоник составляют соответственно 0,6 и 0,10% от основной первой гармоники поля.

Расчеты, полученные с помощью метода конечных разностей и метода токовых отображений, совпадают с точностью 10^{-4} для первых семи гармоник.

Расчеты магнитного поля с помощью программы POISSON проведены с точностью 10^{-4} (см. /2/).

Проведенное численное моделирование магнитного поля СП диполя D_4 послужит основой для создания модели такого магнита.

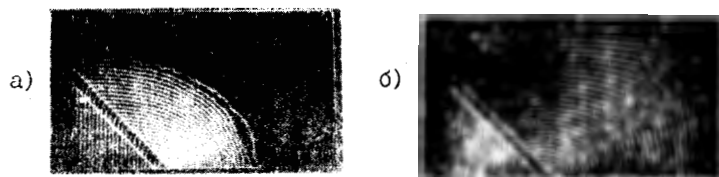


Рис.12. Эквипотенциалы для СП диполя D_2 :
а) $I = 500$ А, б) $I = 2500$ А.

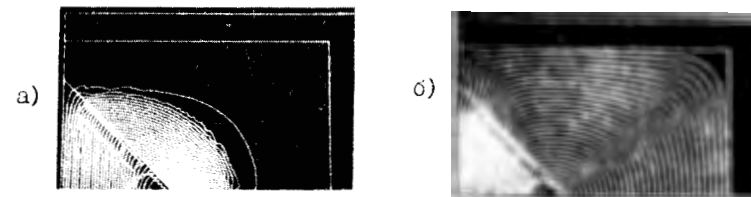


Рис.13. Эквипотенциалы для СП диполя D_4 :
а) $I = 500$ А, б) $I = 2500$ А.

Таблица 2

Сравнение величин B_I и C_n (%) на радиусе $r = 2,0$ см для тока $I=500$ А в витке СП обмотки диполя D_4 при расчёте с помощью программ MIC2M и POISSON

| | MIC2M без железа | MIC2M | POISSON |
|----------|---------------------|---------|---------|
| B_I, T | 0,40474 | 0,7334 | 0,7335 |
| C_3 | -13,7446 | -0,0041 | 0,0268 |
| C_5 | 2,3785 | -0,0026 | -0,0680 |
| C_7 | 3,2190 | 2,1506 | 2,1077 |
| C_9 | 1,0829 | 0,5145 | 0,4004 |
| C_{II} | 0,9736 | 0,5629 | 0,3811 |
| C_{I3} | 0,3759 | 0,2092 | -1,0997 |

ЛИТЕРАТУРА

1. Шелаев И.А., Юдин И.П. ОИЯИ, Р9-80-333, Дубна, 1980.
2. Жидков Е.П. и др. ОИЯИ, Р9-81-12, Дубна, 1981.
3. Алфеев В.С. и др. Труды УП Всесоюзного Соперания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1981, т.1, с.360-363.
4. Шелаев И.А., Юдин И.П.. ОИЯИ, 9-12346, Дубна, 1979.

5. Балдин А.М. и др. Труды IV Всесоюзного Сопещения по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т.2, с.4-8.
6. Jacob U., Umstätter H.H. CERN Report MPS/Int., RF 64-14, 1964
7. POISSON Group Programs . User's Guide, CERN, 1975.
8. Ворожцов С.Б., Дударева Т.Н., Полякова Р.В., Сергеева Н.В. БИ-II-12070, ОИЯИ, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 декабря 1983 года.

Борисовская З.В. и др. P11-83-893
Численное моделирование двумерного магнитного поля 3 Т СП диполя с железом

Проведено численное исследование возможности получения технологически приемлемой конфигурации сверхпроводящего /СП/ диполя, обеспечивающей высокооднородное поле на уровне 3 Т. Получена зависимость нелинейностей поля C_n от величины индукции В. Проведено сравнение двух типов СП диполей с прямоугольной апертурой. Проведено сравнение двух методов моделирования двумерного магнитного поля в магнитах, имеющих прямоугольную апертуру. Результаты работы, полученные с помощью пакета программ POISSON и программы MIC2M, показывают, что найденная конфигурация СП диполя обеспечивает величину высокооднородного поля в апертуре магнита на уровне 3 Т, в то время как магнитная индукция в железном сердечнике не превосходит величины 2,1 Т.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий и Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Borisovskaya Z.V. et al. P11-83-893
Two-Dimensional Magnetic Field Numerical Simulation of 3 T Superconducting Dipole with Iron Yoke

A numerical investigation of a possibility to get an acceptable technological configuration of superconducting (SC) dipole that provides high-homogeneous 3 T field is carried out. The dependence of the field nonlinearity with a value of B induction is received. Two types of SC dipoles with rectangular aperture are compared. Two methods of two-dimensional magnetic field simulation in the magnets with rectangular aperture are compared. These calculation have been performed using POISSON and MIC2M programs. The results indicate that this SC dipole configuration provides the 3 T value of high-homogeneous field in the magnet aperture, while the magnet induction inside the yoke does not exceed 2.1 T.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой