

**сообщения  
Объединенного  
Института  
Ядерных  
Исследований  
Дубна**

9-86-714

**З.В.Борисовская, А.М.Донягин, А.А.Смирнов,  
И.А.Шелаев**

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ДИПОЛЯ НУКЛОТРОНА**

**1986**

В рамках программы "Нуклотрон" /1/ для отработки технологии изготовления магнитов из трубчатого сверхпроводника и получения экспериментальных характеристик был создан полномасштабный дипольный магнит /2/.

Особенностью магнита является такая конфигурация апертуры диполя, при которой железное ярмо в несколько раз снижает число ампер-витков обмотки, необходимое для создания магнитного поля заданной величины.

Возможность достижения равномерной укладки витков обмотки и большая протяженность магнита создают высокооднородное поле в рабочей части апертуры на ~96% длины магнита. Поэтому решающим фактором, влияющим на величину нелинейности поля на торцах магнита, являлась не конфигурация обмотки, а выбор оптимальных размеров изоляционных прокладок на торцах магнита.

В данной работе рассматривается возможность уменьшения краевых и интегральных нелинейностей при оптимизации формы лобовой части магнита.

Численное моделирование поля сверхпроводящего диполя (СП) и анализ нелинейных эффектов, связанных с насыщением ярма и влиянием изоляционных прокладок, проводился на основе метода объемных интегральных уравнений (система программ MAGSYS<sup>3</sup>) и на основе метода сопряженных градиентов (система программ (POISCR) POISSON)<sup>4</sup>. Расчеты проводились с использованием табличной зависимости  $\mu = \mu(B)$  для данного сорта трансформаторной стали.

Численная модель обмотки СП-диполя при расчетах по трехмерной методике представлена на рис. 1. Конфигурация поперечного сечения СП-диполя, использованная в расчетах по двумерной методике, представлена на рис. 2. Нелинейные искажения формы поля, создаваемые изоляционной прокладкой  $\delta$  между полюсом магнита и обмоткой, вызывают появление нелинейностей в центральной области магнита. Если в расчетах не принимать во внимание ошибки изготовления магнита, то неоднородная часть магнитного поля в центральном сечении магнита может быть представлена следующим образом:

$$H_y(x, y)_{y=0} = H_0 \sum_{n=2}^{\infty} C_n \left(\frac{x}{RN}\right)^{n-1},$$

где  $x, y$  — горизонтальная и вертикальная координаты;  $H_0$  — напряженность поля в центре диполя;  $RN$  — радиус нормализации в данной работе

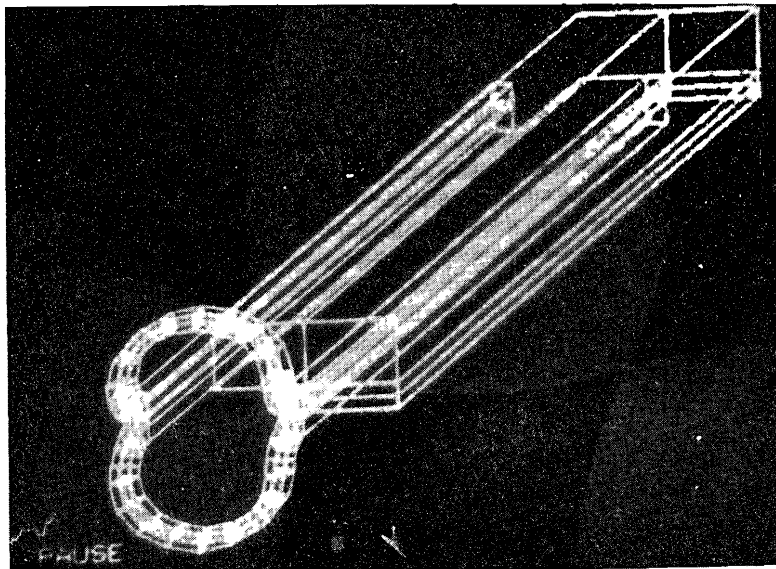


Рис. 1. Численная модель СП-обмотки дипольного магнита.

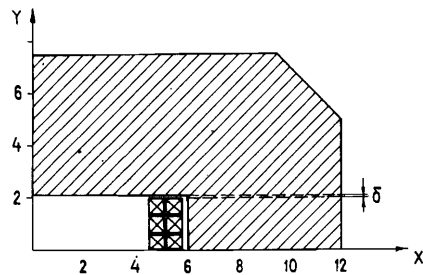


Рис. 2. Конфигурация поперечного сечения диполя, использованная в расчетах по POISSON (POISCR).

принимается равным радиусу  $R$ , на котором исследуется поле;  $C_n$  — относительная нелинейность на расстоянии  $RN = 1,9$  см от оси магнита.

В силу симметрии диполя отличны от нуля лишь коэффициенты  $C_n$  с нечетными индексами.

Как известно, основное влияние на движение частиц оказывают секступольная ( $C_3$ ) и декапольная ( $C_5$ ) компоненты поля. Исследование неоднородности магнитного поля показывает, что именно они дают основной вклад в неоднородность поля диполя.

Расчетные значения этих величин при  $\delta = 0,1$  см представлены в табл. 1 (расчет по MAGSYS) и в табл. 2 (расчет по POISSON) в зависимости от величин тока в СП-обмотке.

Таблица 1

Характеристика поля в центральном сечении СП-диполя  
 $R = RN = 1,9$  см,  $\delta = 0,1$  см (MAGSYS)

I, кА	B, кЭ	B/I, $\frac{\text{кЭ}}{\text{кА}}$	$C_3, \%$	$C_5, \%$	$C_7, \%$
2,3	8211,6	3,57	0,028	0,009	0,011
4,3	15265,2	3,55	0,022	-0,029	-0,037
5,3	18601,9	3,51	-0,113	-0,013	0,008
6,3	21483,5	3,41	-0,462	-0,006	0,031

Таблица 2

Характеристика поля в центральном сечении СП-диполя  
 $R = RN = 1,9$  см,  $\delta = 0,1$  см (POISSON (POISCR))

I, кВ	B, кВ	B/I, $\frac{\text{кЭ}}{\text{кА}}$	$C_3, \%$	$C_5, \%$	$C_7, \%$
2,3	8248,9	3,59	0,027	0,015	0,004
4,3	15366,7	3,57	0,021	0,016	0,004
5,3	18769,1	3,54	0,068	0,018	0,004
6,3	21742,8	3,45	0,143	0,021	0,008

При номинальном значении индукции поля точность расчета нелинейностей для центрального поля по программе MAGSYS  $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ .

Для уровней поля  $B \leq 1,55$  Тл значения секступольной и декапольной гармоник не превышают  $\sim 3 \cdot 10^{-4}$  от основной компоненты поля. Для этого уровня поля приведенные расчетные данные находятся в хорошем согласии ( $\sim 4 \cdot 10^{-4}$ ) с результатами измерений плоскими индукционными катушками (табл. 3).

Методические оценки показали, что система программ POISSON (POISCR) для данного магнита обеспечивает точность расчета нелинейностей  $\sim 10^{-5}$ , а измерения индукционными катушками — не хуже  $\sim 10^{-4}$ .

Измерения магнитного поля дипольного магнита проводились методом гармонического анализа при величине тока в магните до 6 кА.

Таблица 3

Измерения центрального поля индукционными катушками

I, кА	B, кЭ	B/I, $\frac{\text{кЭ}}{\text{кА}}$	C <sub>3</sub> , %	C <sub>5</sub> , %
2,348	8368,0	3,564	0,024	0,016
4,302	15265,1	3,549	0,023	0,017
5,376	18744,1	3,486	0,026	0,020

Разделение индукционного датчика на три секции вдоль оси магнита позволило исследовать магнитное поле в центральной области, а также определить его интегральное значение. Результаты расчетов и измерений показывают, что насыщение ядра дипольного магнита сказывается на секступольной и, частично, декапольной гармониках и почти не влияет на додекапольную гармонику (C<sub>7</sub>). Для центральной области магнита расчеты по трехмерной методике не позволяют увеличить относительную точность расчета нелинейностей до уровня  $\sim 10^{-4}$ . Основной причиной является недостаточная оперативная память ЭВМ для расчета протяженных магнитных систем. Отсюда расчеты трехмерных магнитоэстатических полей нацелены, в основном, на расчет краевых полей на лобовых частях магнита. В таких условиях целесообразно несколько упростить задачу, осуществляя расчеты центрального поля в приближении бесконечно длинного магнитопровода. Это правомерно для магнитов, у которых велико отношение длины к его поперечным размерам.

На рис. 3. представлено распределение суммарной неоднородности  $\Delta B/B_0$  в апертуре диполя вдоль оси X (см. рис. 2) для различных значений индукции поля. Пунктиром отмечена граница области, на которой проводится гармонический анализ (RN). Суммарная неоднородность для индукции поля до 2,3 Тл не превышает  $\sim 0,1\%$ . Однако в пределах всей апертуры она достигает нескольких процентов.

На рис. 4 представлены результаты измерений нелинейности поля индукционной катушкой, захватывающей центральную область модельного диполя (I) и (II) — только лобовую часть. Видно, что с увеличением тока эффекты насыщения железного ядра более сказываются на лобовой части магнита, и, в основном, за счет роста секступольной (C<sub>3</sub>) гармоники поля (на  $\sim 0,15\%$ ). Полученные результаты хорошо согласуются ( $\sim 10^{-4}$ ) с результатами расчетов для центральной области дипольного магнита (POISSON) и не противоречат результатам расчета нелинейностей на торцах диполя (MAGSYS). Этот

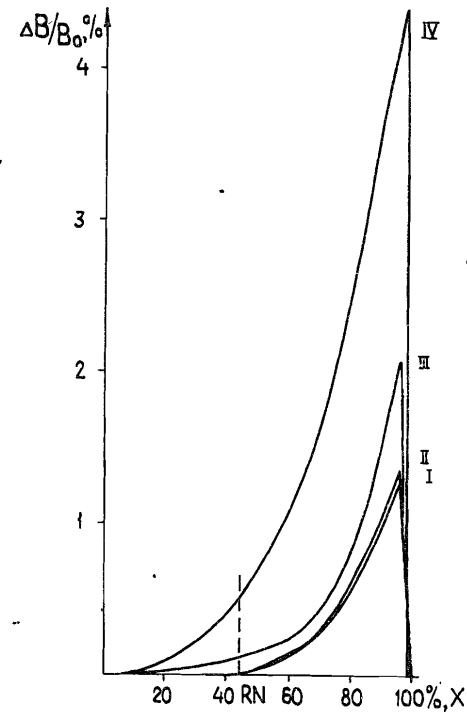


Рис. 3. Распределение суммарной неоднородности поля в апертуре диполя для значений тока I-2,3 кА; II-4,3 кА; III-5,3 кА, IV-6,3 кА.

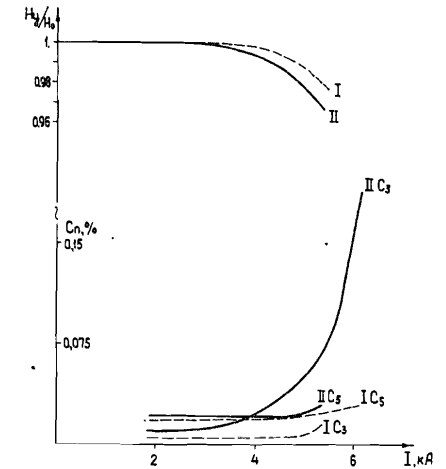


Рис. 4. Зависимость нелинейностей СП-диполя от величины тока, полученная в измерениях индукционными катушками поля в центральной области диполя (I) и на торцах (II).

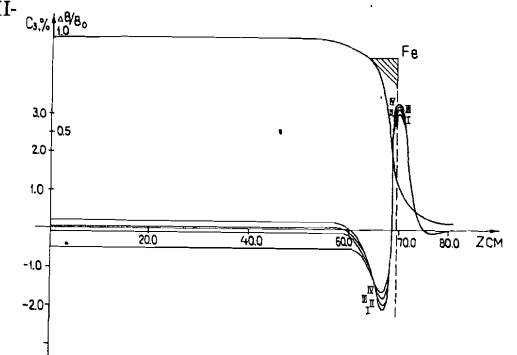


Рис. 5. Распределение  $\Delta B/B_0$  для значения тока 4,3 кА и C<sub>3</sub> и C<sub>5</sub> гармоник вдоль оси диполя в зависимости от величины тока: I кривая соответствует току 2,3 кА; II — 4,3 кА; III — 5,3 кА; IV — 6,3 кА.

вывод вытекает из анализа результата расчета, представленного на рис. 5, где для модельного СП-диполя показана зависимость  $\Delta B/B_0$  при токе 4,3 кА от продольной координаты Z (ось Z вдоль оси магнита) и поведение секступольной гармоники в зависимости от

от величины тока и по всей длине магнита. Необходимо напомнить, что результаты получены для рабочей области магнита ( $RN = 1,9$  см), что составляет ~40% апертуры модельного СП-диполя. Отсюда суммарная неоднородность поля, составляющая ~0,2% от основной компоненты поля, становится еще более заметной на краях апертуры. Поскольку на движение частиц оказывает влияние интегральная нелинейность, необходимо было исследовать возможности ее подавления. На рис. 6 показан продольный разрез дипольного магнита. Пунктиром отмечены дополнительные области железного ярма магнита, изменяющие величину изоляционной прокладки между лобовой частью обмотки и ярмом. На рис. 7 представлены результаты расчета зависимости распределения краевых нелинейностей от толщины прокладки для уровня поля ~1,5 и ~2,2 Тл (рис. 8). Естественно, что в расчетах с увеличением длины магнитопровода общая длина СП-диполя по обмотке оставалась постоянной. Был рассмотрен лишь вариант изменения

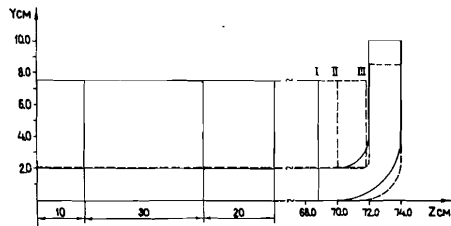


Рис. 6. Продольное сечение СП-диполя (модель, использованная в расчетах).

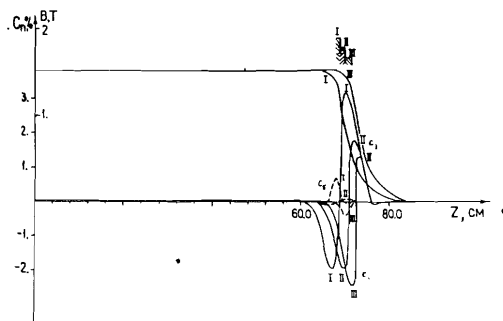


Рис. 7. Распределение нелинейностей поля вдоль оси магнита для значения тока  $I = 4,3$  кА в зависимости от величины изоляционной прокладки между лобовой частью обмотки и ярмом магнита.

радиуса изгиба обмотки на торце магнита (см. рис. 6), который не привел к существенному изменению результатов. С увеличением длины магнитопровода характер изменения секступольной нелинейности (рис. 7 и 8) позволяет найти ее минимальную величину, при которой значение интегральной амплитуды секступольной гармоники, полученное численным интегрированием расчетных кривых, достигает в рабочей области токов наимень-

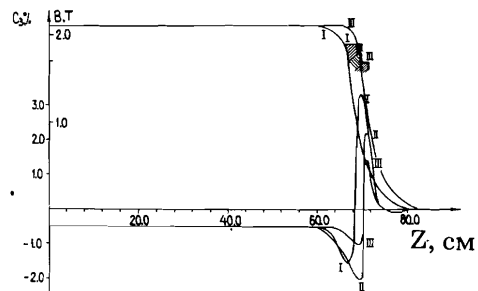


Рис. 8. Распределение нелинейностей поля вдоль оси магнита для значения тока  $I = 6,3$  кА в зависимости от величины изоляционной прокладки.

шего значения. Расчетные значения интегральных амплитуд секступольной и декапольной гармоник, полученные численным интегрированием кривых (рис. 5, 7, 8), а также значения эффективной длины диполя в зависимости от уменьшения изоляционной прокладки и увеличения таким образом общей длины магнитопровода представлены в табл. 4. В ней приведены также для сравнения данные, полученные в измерениях индукционными катушками модельного СП-диполя.

Таблица 4

Характеристики интегрального поля СП-диполя.  
 $R = RN = 1,9$  см,  $\delta = 0,1$  см

I, кА	$L_{Fe}$ , см	$L_{эф}$ , см	$C_3$ , %	$C_3$ , %	$C_3$ , %	$C_5$ , %	$C_5$ , %
			MAGSYS	MAGSYS + POISSON			
2,3			0,071	0,068	0,030	0,011	0,019
4,3	137,6	140,0	0,068	0,069	0,041	-0,009	0,023
5,3	$\Delta = 3,2$		0,063	0,128	0,080	-0,012	0,028
6,3			-0,423	0,202	0,191	-0,006	0,030
4,3	1,410	142,8	0,009	0,008		-0,029	
6,3	$\Delta = 1,5$		-0,430	0,078		-0,014	
4,3			-0,054	-0,058		-0,033	
6,3	1,436	145,6	-0,450	0,110		-0,027	
	$\Delta = 0,2$						

Необходимо заметить, что для модельного СП-диполя с увеличением индукции поля изменение эффективной длины является незначительным по сравнению с магнитами установки СПИН<sup>15/</sup>. Этого следовало ожидать, поскольку вклад насыщающихся торцов оказывает существенно меньшее влияние при большой длине магнитопровода. Величина интегральной амплитуды секступольной гармоники для модельного СП-диполя практически постоянна для индукций поля до 1,8 Тл и увеличивается до ~0,2% при номинальном токе в СП-обмотке.

Для уменьшения величины интегральной амплитуды секступольной гармоники, исходя из расчетов, необходимо уменьшить величину

ну изоляционной прокладки на торцах магнита до  $\Delta = 1,5$  см. Дальнейшее уменьшение изоляционной прокладки возможно, но не даст уменьшения интегральной амплитуды секступольной гармоники.

Влияние размеров изоляционной прокладки на торцах диполя на величину интегральной амплитуды декапольной гармоники и изменение ее с ростом индукции поля оценивается из расчетов (табл. 4) для всего рабочего диапазона токов величиной  $C_5 \leq 0,03\%$ , что находится за пределами точности расчетов с помощью системы программ MAGSYS. Расчеты по MAGSYS для модельного СП-диполя проводились при 80 элементах разбиения магнитопровода на  $1/4$  диполя по поперечному сечению и половине его длины.

Контрольные расчеты проводились при увеличенном почти вдвое (144) числе элементов разбиения магнитопровода. Нижний предел по числу элементов разбиения определялся необходимой точностью расчетов, а верхний — ограничивался большим временем счета на ЭВМ CDC-6500.

Конечно, в расчетах трехмерных магнитостатических полей при ограниченной оперативной памяти ЭВМ важно учитывать факторы, влияющие на точность расчета магнитного поля. Уменьшению числа элементов разбиения способствует использование априорных представлений о структуре магнитного поля в железе и вне его. Кроме того, точность вычисления магнитного поля зависит от того, насколько близко к реальности принятое условие однородности элементов разбиения. Отсюда следует, что области с заведомо сильной неоднородностью поля намагничивания должны разбиваться на большее число элементов (рис. 6). Для протяженных магнитных систем, кроме того, полезно использовать для расчетов в центральной области двумерную методику, так как достоверность расчетных результатов улучшается при использовании различных методов расчета.

Таким образом, для модельного СП-диполя проведено исследование нелинейности поля во всем рабочем диапазоне токов. Показано, что в центральной области диполя на расстоянии нормализованного радиуса  $RN = 1,9$  см суммарная неоднородность поля составляет менее  $0,1\%$ . С увеличением тока эффекты насыщения сказываются сильнее на лобовых частях магнита. Суммарная интегральная нелинейность, основной вклад в которую вносит секступольная гармоника поля, зависит от толщины изоляционной прокладки между лобовой частью обмотки и ярмом магнита. В результате численного исследования этой зависимости была получена оптимальная величина изоляционной прокладки  $\Delta = 1,5$  см, при которой значение суммарной интегральной нелинейности становится менее  $0,1\%$ . Достоверность результатов повышается при использовании различных методик расчета. Численное моделирование поля и анализ нелинейных эффектов проводился в работе с помощью системы программ MAGSYS для расчета трехмерных магнитостатических полей, а для центрального поля — системы программ POISSON (POISCR). Результаты расчетов приведены в сравнении с результатами измерений поля модельного СП-диполя плоскими индук-

ционными катушками. Для индукций поля от  $0 \div 1,6$  Тл наблюдается хорошее совпадение ( $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ ) результатов измерений и расчетов, как для центрального поля, так и для интегрального поля. В области индукций поля более 1,6 Тл, где начинают сказываться эффекты насыщения железного ядра диполя, совпадение результатов измерений и расчетов находится на уровне  $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ .

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность В.С.Алфееву и И.П.Юдину за интерес к работе и обсуждению.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Балдин А.М. и др. В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, "Наука", М., 1975, т.2, с.4.
2. Смирнов А.А. и др., ОИЯИ, Р9-83-625, Дубна, 1983.
3. Борисовская З.В. и др. Б1-9-85-232, Дубна, 1985.
4. Holsinger R.F., Iselin C. The CERN-POISSON Program Package (POISCR). User Guide, 1983.
5. Борисовская З.В. и др. ОИЯИ, 9-84-523, Дубна, 1984.

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 октября 1986 года.

Борисовская З.В. и др.

9-86-714

Исследование нелинейностей магнитного поля  
сверхпроводящего диполя нуклотрона

Для сверхпроводящего диполя нуклотрона проведено численное исследование нелинейностей магнитного поля во всем рабочем диапазоне токов. Показано, что в центральной области диполя на расстоянии нормализованного радиуса  $RN = 1,9$  см нелинейность составляет 0,1%. Интегральная нелинейность для модельного СП-диполя находится на уровне 0,2%. Показано, что при толщине изоляционной прокладки  $\Delta = 1,5$  см между лобовой частью обмотки и ярмом магнита величина интегральной нелинейности составляет менее 0,1%. Для расчета трехмерных магнитоэстатических полей использовалась система программ MAGSYS, для расчета центрального поля — система программ POISSON (POISCR). Результаты расчетов приведены в сравнении с результатами измерений СП-диполя при температуре жидкого гелия. Для индукций поля  $0 \div 1,6$  Тл наблюдается хорошее совпадение ( $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ ) результатов расчетов и измерений. В области индукций поля более 1,6 Тл, где начинают сказываться, особенно на торцах магнита, эффекты насыщения железного ярма, совпадение результатов измерений и расчетов находится на уровне  $1 \cdot 10^{-3}$ .

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Borisovskaya Z.V. et al.

9-86-714

Nonlinearity of Nuclotron Superconducting Dipole Magnetic Field

The nonlinearity of magnetic field for superconducting dipole of nuclotron has been investigated for all current operating range. It is shown that the nonlinearity is 0.1% in the dipole central region at  $RN = 1.9$  cm distance of normalized radius. The integrated nonlinearity for model superconducting dipole is about 0.2%. It is shown that for 1.5 thick insulation gap between the winding ending and the iron yoke the integrated nonlinearity is less than 0.1%. The MAGSYS program package used for calculation of three-dimensional magnetostatic fields, for calculation of central field — the POISSON (POISCR) program package. The calculation results are given in comparison with the results on measuring the dipole superconducting field at liquid helium temperature. A good correspondence between these results for the fields is less than 1.6 T ( $5 \cdot 10^{-4}$ ). For the field more than 1.6 T the saturation of iron yoke of the magnet occurs, and a correspondence between the measurement and calculation results is only  $1 \cdot 10^{-3}$ .

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986