

Б - 825

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 621.384.6

9-90-409

**БОРИСОВСКАЯ  
Земфира Владимировна**

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ТРЕХМЕРНЫХ ПОЛЕЙ  
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СИНХРОТРОННЫХ  
МАГНИТОВ**

**Специальность: 01.04.13 - электрофизика**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Дубна 1990**

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:  
доктор технических наук  
старший научный сотрудник

Игорь Александрович  
ШЕЛАЕВ

Официальные оппоненты:  
доктор физико-математических наук  
старший научный сотрудник  
кандидат физико-математических наук  
научный сотрудник

Александр Григорьевич  
ДАЙКОВСКИЙ  
Олег Ирикович  
ЮДАШЕВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение:  
Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры  
им. Д.В. Ефремова (г. Ленинград).

Защита диссертации состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1990г.  
в "\_\_\_" часов на заседании Специализированного совета  
Д 047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного  
института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области,  
ЛВЭ ОИЯИ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1990 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета

М.Ф. ЛИХАЧЕВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

В Лаборатории высоких энергий в течение ряда лет ведутся работы по применению сверхпроводимости в ускорительной технике. Создан модельный синхротрон СПИН – один из вариантов сверхпроводящих ускорителей. Завершаются работы по созданию ускорителя релятивистских ядер со сверхпроводящей (СП) магнитной системой – НУКЛОТРОНа. В конце 1989 года проведены успешные испытания 1/8 магнитной системы, включающей 12 дипольных магнитов, 4 квадрупольные линзы и два узла ввода жидкого гелия и тока.

Одной из основных систем любого ускорителя является его магнитная система. Создание магнитных систем крупных электрофизических установок требует для своего запуска многих лет работы и значительных материальных затрат. Численное моделирование различных элементов магнитной системы является одним из источников удешевления работ не только на стадии проектирования, но и на стадии их экспериментального исследования. Для проведения численного моделирования необходимо создание эффективного программного обеспечения. Постановка программы *GFUN3D* по расчету пространственных магнитостатических полей, практическое использование и анализ имеющихся зарубежных и отечественных программных комплексов по трехмерному (*GFUN3D*, *MAGSYS*) и двумерному (*POISCR*) расчету магнитостатических полей позволили развить программное обеспечение, ориентированное на численное решение пространственных задач магнитостатики с учетом технологии изготовления и режимов эксплуатации магнитных систем для СП синхротронов.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью разработки для СП ускорителей дипольных и квадрупольных магнитов, обеспечивающих низкий уровень интегральных нелинейностей поля ( $\sim 10^{-4}$ ), имеющих хорошую повторяемость ( $\sim 10^{-4}$ ), стабильность параметров и малую стоимость.

Целью работы является расчетно-теоретическое определение влияния формы обмотки на торцах дипольных и квадрупольных магнитов синхротрона СПИН и НУКЛОТРОНа на распределение поля, выбор оптимальной конструкции дипольных и квадрупольных магнитов, обеспечивающих заданное распределение поля с высокой точностью.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые проведены трехмерный расчет и анализ пространственного распределения магнитного поля магнитов синхротрона<sup>/1-3/</sup>:

а) выполнены исследования влияния формы обмотки и ферромагнитного экрана, насыщения экрана на распределение поля в центральной и особенно в краевой области дипольных и квадрупольных магнитов СП синхротрона СПИН;

б) предложена методика исследования и оптимизации краевых и интегральных характеристик магнитного поля дипольного магнита и квадрупольных линз, обеспечивающая заданное распределение поля в рабочей области.

2. Проведены трехмерный расчет и анализ магнитного поля СП дипольного магнита ускорителя релятивистских ядер - НУКЛОТРОНА. Исследована зависимость относительных нелинейностей магнитного поля и эффективной длины магнита от тока<sup>/6/</sup>.

3. Проведены расчет и анализ магнитных полей СП квадруполь для НУКЛОТРОНА. Выполнены исследования влияния формы обмотки и ферромагнитного экрана на величины относительных нелинейностей магнитного поля и нелинейность градиента от тока<sup>/7/</sup>.

4. Проведено численное моделирование пространственного магнитостатического поля 3Т дипольного магнита новой конфигурации, отличающегося относительной простотой конструкции обмотки за счет введения двух типов кабеля: прямоугольного и треугольного<sup>/8,9,13/</sup>.

5. Проведено комплексное исследование влияния пространственных расчетных и измеренных характеристик магнитных элементов СП синхротрона СПИН на динамику пучка частиц при ускорении и показана возможность обеспечения устойчивой динамики пучка частиц в ускорителе без дополнительных корректирующих элементов<sup>/10/</sup>.

Практическая ценность работы состоит в том, что результаты исследований нашли практическое применение при создании модельного СП синхротрона СПИН и магнитных элементов регулярной структуры СП ускорителя релятивистских ядер - НУКЛОТРОНА.

1. Выбрана оптимальная конфигурация токовой обмотки на торцах дипольного магнита СП синхротрона СПИН<sup>/1-3/</sup>.

2. Выбрано оптимальное расстояние между обмоткой и яром на торцах дипольного и квадрупольного магнита СП синхротрона СПИН<sup>/4,5/</sup> и дипольного магнита НУКЛОТРОНА<sup>/6/</sup>, позволившее минимизировать величины относительных нелинейностей магнитного поля.

3. Предложена однослойная конфигурация обмотки квадрупольной линзы, при которой нелинейности магнитного поля и нелинейность градиента в зависимости от тока имеют минимальное значение<sup>/7/</sup>.

4. Выбрана достаточно простая конфигурация обмотки 3Т дипольного магнита, отвечающая всем требованиям, предъявляемым к магнитам синхротронов<sup>/8,9,13/</sup>.

5. Существенно расширен комплекс программ MAGSYS<sup>/14/</sup> по расчету пространственного распределения магнитостатических полей, за счет описания различных конфигураций обмоток магнитов, что обеспечило возможность расчета магнитов для синхротронов<sup>/11,12/</sup>.

#### Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались автором и обсуждались на научных семинарах отделов ускорителя Лаборатории высоких энергий, отдела вычислительной математики Лаборатории вычислительной техники и автоматизации и отдела новых ускорителей Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, а также докладывались автором на Республиканской научно - технической конференции "Интегральные уравнения в прикладном моделировании" (Киев, 1983г.) и представлялись на VII Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1980 г.), на IX Международной конференции по криогенной технике (Кобэ, Япония, май 1982г.), на XII Международной конференции по ускорителям высоких энергий (Батавия, США, август 1983г.), а также на I Европейской конференции по ускорителям заряженных частиц (Рим, Италия, июнь 1988г.)

Публикации. В основу диссертации положено 12 публикаций и одно авторское свидетельство.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 138 страницах текста (из них 125 страниц основного) и состоит из введения, трех глав, заключения и приложения, содержит 55 рисунков и 22 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 137 наименований.

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации, приводится цель, научная новизна, отмечается практическая ценность работы. Кратко рассмотрено содержание глав диссертации и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дается краткий сравнительный анализ наиболее популярных методов расчета магнитостатических полей: дифференциального и интегрального. Эти методы допускают эффективную численную реализацию, оформлены в виде пользовательских программ и ис-

пользовались автором в расчетах магнитостатических полей электро-физических установок.

В § 1.1 описывается дифференциальный подход к решению задач магнитостатики, который состоит в численном решении уравнений Максвелла:

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} \quad (1)$$

в частных производных. Здесь  $\mathbf{B} = \mu \mu_0(\mathbf{H})\mathbf{H}$  – магнитная индукция,  $\mathbf{j}$  – плотность тока,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость среды,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м (магнитная постоянная),  $\mathbf{H}$  – напряженность магнитного поля.

Для решения уравнений (1) можно ввести векторный потенциал  $\mathbf{A}$ , определяемый как

$$\operatorname{rot} \mathbf{A} = \mathbf{B}. \quad (2)$$

С учетом соответствующих граничных условий, подстановка (2) в (1) приводит к уравнению:

$$\operatorname{div} \left( \frac{1}{\mu} \operatorname{grad} \mathbf{A} \right) = \mu_0 \mathbf{j}. \quad (3)$$

В случае рассмотрения плоских или аксиально-симметричных задач нелинейное дифференциальное уравнение (3) имеет в декартовой системе координат вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) = \mu_0 \mathbf{j}(x, y). \quad (4)$$

Здесь  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{j}$  – значения компонент векторов  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{j}$ , нормальных плоскости расчета.

Наиболее распространенной программой, использующей векторный потенциал при решении уравнений Максвелла в дифференциальной постановке, является программа *POISCR*. Для магнитов с прямоугольной конфигурацией железного ядра и равномерной укладкой витков система программ *POISCR* позволяет проводить расчет основной гармоники поля с точностью  $10^{-4}$ , а относительных нелинейностей поля с точностью  $\sim 5 \cdot 10^{-5/6, 7/}$ . Основным критерием, ограничивающим круг задач, решаемых с помощью системы программ *POISCR*, является невозможность проведения трехмерных расчетов магнитостатических полей.

Как и в случае дифференциальных методов решения уравнений магнитостатики, в интегральных методах, рассматриваемых в § 1.2, возможна постановка магнитостатической задачи с векторной искомой

функцией. В этом случае представляем напряженность магнитного поля в виде суммы векторов:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_j + \mathbf{H}_f, \quad (5)$$

где  $\mathbf{H}_j$  – напряженность магнитного поля в вакууме от токовой обмотки, занимающей объем  $v_j$ , а именно:

$$\mathbf{H}_j = \frac{1}{4\pi} \int_{v_j} \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{R}}{R^3} dv, \quad (6)$$

а  $\mathbf{H}_f$  – напряженность магнитного поля от намагниченной среды, занимающей объем  $v_f$ :

$$\mathbf{H}_f = -\frac{1}{4\pi} \operatorname{grad} \int_{v_f} \frac{(\mathbf{M} \cdot \mathbf{R})}{R^3} dv. \quad (7)$$

Здесь  $\mathbf{R}$  – радиус-вектор, проведенный из бесконечно малого объема  $dv$  в произвольную точку пространства. Учитывая, что вектор намагниченности  $\mathbf{M} = (\mu - 1) \cdot \mathbf{H}$ , окончательный вид уравнения (5) после подстановки в него (6) и (7) будет:

$$4\pi \mathbf{M} = -(\mu - 1) \cdot \left( \operatorname{grad} \int_{v_f} \frac{(\mathbf{M} \cdot \mathbf{R})}{R^3} dv + \int_{v_j} \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{R}}{R^3} dv \right). \quad (8)$$

Для численного решения уравнения (8) объем  $v_f$  разбивается на элементы, а интеграл заменяется на конечную сумму по этим элементам. Магнитная индукция и вектор намагничивания предполагаются постоянными в пределах данного элемента. Интегральное уравнение в форме (8) позволяет получить результат расчета сразу в виде напряженности магнитного поля, однако при построении алгебраической системы в этом случае необходимо учитывать три компоненты  $\mathbf{H}$ . Такая запись интегрального уравнения используется в программе *GFUN3D*, которая была поставлена с участием автора на ЭВМ СДС – 6500<sup>12/</sup>. С помощью этой программы было получено пространственное распределение поля СП экспериментального дипольного магнита погружного типа-СКД для регулярного периода синхротрона СПИН<sup>11/</sup>. Расчетное распределение поля совпало с экспериментальным в пределах точности измерений магнитометром Холла ( $\sim 0,1\%$ ).

Однако расчеты по программе *GFUN3D* ограничены теми конфигурациями обмоток, которые в нее заложены, и несмотря на все их многообразие не включают обмотку, предложенную для новой серии дипольных магнитов СКДУ<sup>13/</sup>. Она отличается от традиционных распределением сверхпроводника на торцах. Последнее уменьшает общую длину магнита при той же длине яра. Поэтому возможности программы были расширены включением в нее описания новой конфигурации обмотки. Полученное распределение уровня поля и амплитуд высших гармоник вдоль оси магнита позволило оценить вклад обмотки, расположенной на торцах магнита, в неоднородность поля. Однако использование программы *GFUN3D* не удовлетворяло автора диссертации по причине недостаточной точности расчетов для данного класса магнитов. Как показали методические оценки<sup>13/</sup>, наблюдаемое отличие измеренных значений амплитуд гармоник от расчетных вызвано ограничением числа разбиений железного яра магнита (36 разбиений на 1/8 части железного яра) на треугольные призмы, связанным с возможностями используемой ЭВМ.

В § 1.3 приводится альтернативная уравнению (8) формулировка интегрального уравнения относительно индукции магнитного поля<sup>11/</sup>:

$$B = \frac{1}{4\pi} \int_{V_f} \frac{(\mu-1)}{\mu} \cdot \left( \frac{3R \cdot (B \cdot R)}{R^5} - \frac{B}{R^3} \right) dv = B_j. \quad (9)$$

Здесь  $B_j$  — магнитная индукция от токовой обмотки.

Запись интегрального уравнения в форме (9) используется в системе программ *MAGSYS*<sup>12/</sup>. Вычислительный алгоритм этой программы основан на аналитическом представлении поля равномерно намагниченного многогранника произвольной формы и решении получающейся системы нелинейных дискретизованных уравнений методом простой итерации в сочетании с методом минимальных невязок и релаксацией намагниченности<sup>14/</sup>.

Во второй главе рассматривается численное моделирование всех элементов магнитной системы синхротрона СПИН. Она состоит из двух суперпериодов, каждый из которых содержит 12 регулярных ФODO периодов и один согласованный промежуток. Каждый регулярный период содержит два дипольных магнита и две квадрупольные линзы — фокусирующую и дефокусирующую.

На рис.1 представлен внешний вид дипольного магнита и квадрупольных линз.

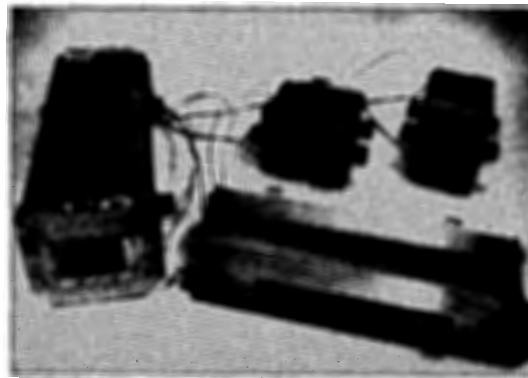


Рис.1. Внешний вид дипольного магнита и линз.

польных линз регулярного периода синхротрона. Численное исследование неоднородностей магнитного поля в апертуре диполя осуществлялось с помощью Фурье — разложения напряженности поля:

$$H_y(R, \theta) = H_1 \cdot \left[ 1 + \sum_{n=2,4,6,\dots,R_N} c_n \left( \frac{R}{R_N} \right)^{n-1} \cdot \cos(n-1)\theta \right], \quad (10)$$

где  $R, \theta$  — полярные координаты,  $H_1$  — величина среднего поля в центре магнита,  $R_N$  — радиус нормализации,  $c_n = \frac{H_n}{H_1}$ .

На рис.2 представлено распределение нелинейностей поля вдоль оси

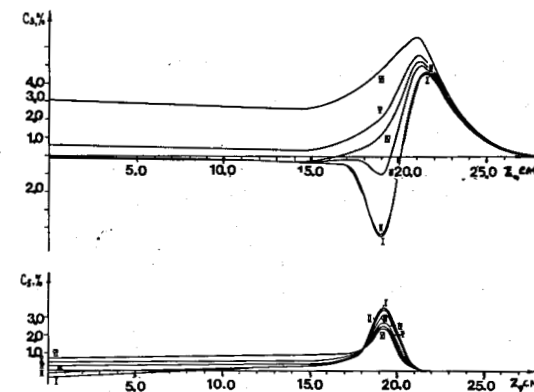


Рис.2. Распределение амплитуд относительных гармоник вдоль оси диполя в зависимости от тока в обмотке: I — соответствует току 0,5 кА, II — 1,0 кА, III — 1,5 кА, IV — 1,7 кА, V — 2,0 кА, VI — 2,5 кА.

дипольного магнита для разных значений тока в обмотке. Видно, что насыщение ярма дипольного магнита начинает сказываться на амплитуде секступольной гармоники при полях 1,85 Т в центральной области магнита. На торцах амплитуда секступольной гармоники заметно увеличивается уже при индукции поля ~ 1,2 Т. Это приводит к тому, что расчетные значения интегральных амплитуд секступольной гармоники, полученные численным интегрированием кривых, представленных на рис.2, также возрастают при полях ~ 1,2 Т. Значение декапольной гармоники на торцах магнита с увеличением тока уменьшается. Поэтому расчетное значение интегральной амплитуды декапольной гармоники, равное 0,2%, остается практически постоянным для всех значений индукции поля. На рис.3 представлены полученные расчетным путем интегральные нелинейности поля дипольного магнита в зависимости от изменения тока в СП обмотке в сравнении с результатами измерений индукционными катушками (пунктирные кривые). Видно, что измерения

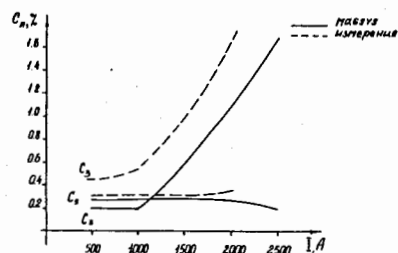


Рис.3. Распределение интегральных нелинейностей ( $C_n$ ) поля СП диполя в зависимости от тока ( $I$ ).

дают величину интегральной амплитуды гармоник на 0,2% выше расчетной, но характер их изменений с током аналогичен. Расчетное значение эффективной длины дипольного магнита совпало с полученным в измерениях индукционными катушками одного из серии рабочих магнитов при температуре жидкого гелия. Измерения эффективной длины для всей серии магнитов проводились и при комнатной температуре. Средняя эффективная длина дипольных магнитов 43,71 см с точностью 0,08% совпадает со значением, полученным из расчетов по программе MAGSYS.

Проведенные расчетно-теоретические исследования влияния формы обмотки на торцах магнита и расстояния между лобовой частью обмотки и ярмом на величину интегральных нелинейностей показали

сильную зависимость интегральных нелинейностей от этих параметров. Они позволили выбрать оптимальное расстояние между лобовой частью обмотки и ярмом равное 8 мм при выбранной конфигурации обмотки на торцах дипольного магнита.

В качестве фокусирующих элементов регулярной структуры синхротрона СПИН были выбраны квадрупольные линзы типа линз Пановского (см. рис.1), численная модель которых представлена на рис.4. В от-

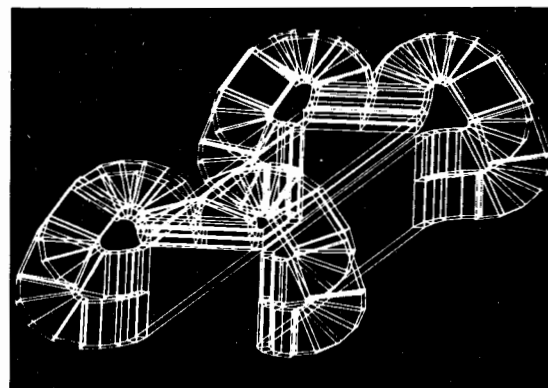


Рис.4. Численная модель СП обмотки линзы регулярного периода (типа линзы Пановского).

личии от дипольных магнитов на торцах квадрупольной линзы обмотка имеет два слоя. Относительно небольшая длина линзы по сравнению с апертурой приводит к заметному влиянию ее торцов на интегральную нелинейность поля. При учете реальных размеров линзы по длине становится заметной величиной нелинейность градиента от тока. Как следует из расчетов по программе MAGSYS<sup>'11'</sup>, величину градиента можно считать постоянной лишь на 0,5 длины железного ярма, считая от центра линзы. Это обстоятельство учитывалось при проведении измерений поля индукционными катушками в центральной области квадрупольного поля. Разложение поля на гармонический состав для квадрупольного поля может иметь следующий вид:

$$H_y(R, \theta) = H_2 \cdot \left[ \frac{R}{R_N} \cos \theta + \sum_{n=4,6,8,\dots,R_N} C_n \left( \frac{R}{R_N} \right)^{n-1} \cdot \cos(n-1) \theta \right]. \quad (11)$$

Здесь  $H_2 = b \cdot R_N$ ,  $b$  — градиент поля в линзе, а  $C_n = \frac{H_n}{H_2}$ .

Распределения относительных амплитуд высших гармоник поля вдоль оси линзы (см. рис.5) показывают, что на торцах линзы все  $C_n$  увеличиваются с ростом тока, но не становятся больше 0,8%. Расчетные значения интегральных амплитуд не превышают  $0,2 \pm 0,3\%$  от основной на радиусе  $R_N = 1,5$  см, что составляет 90% апертуры СП квадруполь по обмотке. Измерения индукционными катушками гармонического состава нелинейностей магнитного поля подтвердили полученные в расчетах величины /4/.

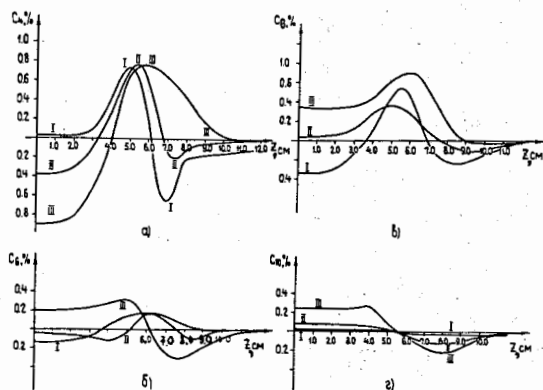


Рис.5. Распределение нелинейностей поля вдоль оси СП квадруполь в зависимости от тока в обмотке: I кривая соответствует току 0,5 кА, II - 1,0 кА, III - 1,5 кА.

Разработанная методика исследования и оптимизации краевых и интегральных характеристик магнитного поля была применена и для численного исследования пространственного распределения магнитного поля СП квадруполь согласованного промежутка. Полученные значения эффективных длин фокусирующих и дефокусирующих квадруполь, а также значения интегральных нелинейностей показывают, что с ростом тока эффективная длина СП квадруполь согласованного промежутка остается практически постоянной, а интегральные амплитуды относительных гармоник  $C_4$  и  $C_6$  с ростом тока ведут себя по-разному, но значения их амплитуд не превышают 0,16%. Полученные результаты по моделированию пространственных магнитных полей квадруполь согласованного промежутка свидетельствуют о возможности использования данных квадрупольных магнитов в качестве согласующих линз прямолинейного промежутка.

Численное исследование влияния разброса эффективных длин дипольных магнитов, а также эффективных длин и градиентов квадрупольных линз в регулярных периодах и согласованных промежутках на

поперечный размер пучка и расчетную частоту бетатронных колебаний проводилось с помощью адаптированной и поставленной автором на ЭВМ CDC-6500 программы SYNCH<sup>10/</sup>. Анализ результатов исследования показал, что учет измеренных значений эффективных длин дипольных магнитов и эффективных длин и градиентов квадрупольных линз приводит к искажению замкнутой орбиты не более 5мм, а рабочая точка по частотам бетатронных колебаний ( $\nu_x = 7,3$ ,  $\nu_y = 6,25$ ) может быть установлена подбором токов только в F и D - линзах регулярного периода при условии независимого электрического питания.

Теоретические и расчетные данные и выводы, сделанные во второй главе, получили экспериментальное подтверждение в результате измерений характеристик магнитных полей рабочих магнитов индукционными катушками при комнатной температуре и температуре жидкого гелия /4, 5/.

В третьей главе рассмотрено численное моделирование пространственных магнитостатических полей элементов регулярной структуры магнитной системы НУКЛОТРОНа. В качестве поворотных дипольных магнитов ускорителя были предложены прокачные магниты с уровнем поля ~ 2 Т и обмоткой из трубчатого сверхпроводника. Использование трубчатого сверхпроводящего кабеля упрощает конструкцию криостата и облегчает доступ к магнитной системе ускорителя. Численное исследование пространственных характеристик магнитного поля магнита и анализ нелинейных эффектов, связанных с насыщением ярма магнита и влиянием изоляционных прокладок, проводился с помощью системы программ MAGSYS. На рис.6 представлена численная модель обмотки

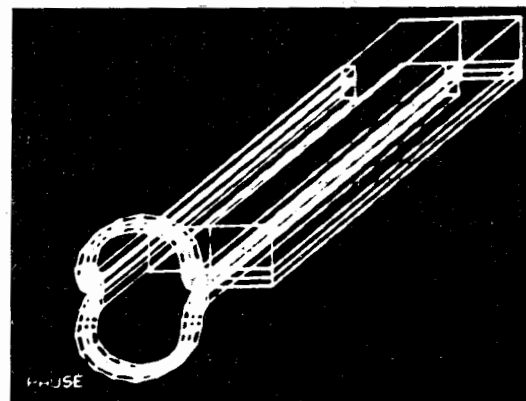


Рис.6. Численная модель обмотки и 1/8 железного ярма СП дипольного магнита НУКЛОТРОНа.





ристики квадрупольного магнита. Численными исследованиями были подтверждены выводы, сделанные во второй главе. Однако использовать СП квадруполь с прямоугольной апертурой типа линзы Пановского можно только в качестве фокусирующих линз регулярного периода НУКЛОТРОНа, стремясь достичь минимума по расходу железа. В качестве дефокусирующих линз необходимо выбрать линзы с расширенной апертурой<sup>15/</sup>. Технологически же желательно иметь все квадрупольи одного типа.

На рис.9 представлена конфигурация поперечного сечения явно-полосной линзы нескольких вариантов, использованная в двумерных расчетах. Численные эксперименты показали, что с увеличением тока

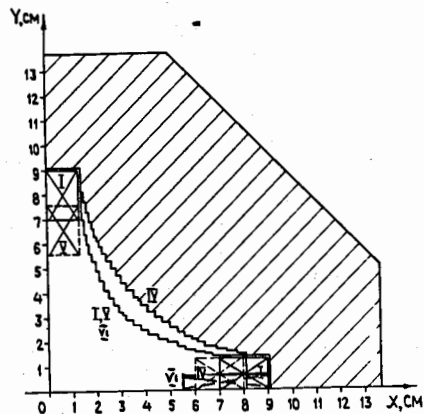


Рис.9 Конфигурация поперечного сечения явно-полосной линзы (расчеты с помощью POISCR).

в СП обмотке I варианта линзы до максимальных значений происходит сильное насыщение железного ярма, что приводит к значительной нелинейности градиента до  $(\Delta B/B) = 23,83\%$ . Она обусловлена, в основном, насыщением полюса железного ярма в особенности той его части, которая примыкает к обмоткам линзы. Этот вывод подтвердился результатами расчетов II, III и IV вариантов, которые отличались от первого формой полюса. В этих вариантах он имел форму части окружности с центром в точке пересечения граней ярма. Различаются эти варианты величиной радиуса окружности. Однако наиболее предпочтительными оказались V и VI варианты конфигураций симметричной линзы с гиперболическим профилем полюса первого варианта, но со смещенными к центру линзы на максимально возможное расстояние токовыми обмотками. Величина смещения находится из работы<sup>15/</sup> в зависимости

от заполнения пучком частиц апертуры магнитных элементов НУКЛОТРОНа при медленном выводе. Нелинейность градиента от тока при градиенте 35 Т/м для этих линз составляет соответственно  $(\Delta B/B)_{V_1} = 0,23\%$  и  $(\Delta B/B)_{V_2} = 1,25\%$ . Однако в случае симметричной линзы с однослойной обмоткой значение 12-полосной гармоники наименьшее. Кроме того, можно отметить, что вариант симметричной линзы с однослойной обмоткой при трубчатом сверхпроводнике более удобен при изготовлении. Используя опыт по теоретически-расчетному исследованию качества магнитного поля на торцах, можно предположить, что однослойная обмотка даст наименьшее значение нелинейностей поля на торцах линзы. Проведенные в последнее время измерения подтвердили полученные результаты численного моделирования.

Для оценки точности расчетов, проводимых с помощью системы программ POISCR, численное моделирование проводилось при числе узлов расчетной сетки до  $N = 22000$ . Основные результаты получены при  $N = 16000$ , при этом точность вычисления градиента  $B$  составляет  $\sim 7,7 \cdot 10^{-4}$ , а  $\Delta C_n \geq 5 \cdot 10^{-5}$ .

В § 3.4 третьей главы приведены расчетные характеристики сверхпроводящего дипольного магнита, отличающегося простотой и экономичностью конструкции и обеспечивающего получение высокооднородного магнитного поля величиной до 3 Т в апертуре магнита при индукции в ярме магнита около 2 Т. Оригинальность конструкции магнита состоит в использовании двух форм СП кабеля: треугольного и прямоугольного<sup>9,13/</sup>. Предложенную пространственную конфигурацию 3 Т дипольного магнита с высокооднородным полем можно считать развитием класса магнитов с полем, формируемым железом.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Разработана методика и проведено комплексное исследование прецизионных мультипольных магнитов СП синхротрона СПИН:

а) получены результаты, позволяющие сформировать высокооднородное магнитное поле на всей длине дипольного магнита;

б) результаты проведенного численного анализа магнитного поля СП дипольного и квадрупольного магнитов регулярного периода синхротрона использовались при проведении измерений и помогли в интерпретации их результатов;

в) численно проанализирована структура магнитного поля квадрупольных магнитов согласованного промежутка синхротрона, показана возможность формирования магнитных полей с заданными параметрами.

2. Разработанная методика позволила провести комплексное ис-

следование и оптимизацию СП магнитов ускорителя релятивистских ядер — НУКЛОТРОНа:

а) выполнен анализ влияния конфигурации обмотки на лобовых частях дипольного магнита на гармонический состав поля в рабочей области и предложен способ компенсации краевой нелинейности;

б) на основе численного моделирования выполнен анализ влияния конфигурации обмотки и железного ядра на качество магнитного поля в центральной области квадрупольа и в двумерном приближении найдена оптимальная конфигурация токовой обмотки и железного ядра;

в) проведен анализ влияния неточностей изготовления профиля полюса железного ядра квадрупольного магнита на гармонический состав поля.

3. Проведено комплексное исследование влияния пространственных характеристик магнитных элементов СП синхротрона СПИН на динамику пучка частиц при ускорении и показана возможность обеспечения устойчивой динамики пучка частиц без дополнительных корректирующих элементов.

4. Предложена и исследована новая пространственная конфигурация дипольного сверхпроводящего магнита с железным ядром, отличающегося простотой и экономичностью конструкции и обеспечивающего получение высокооднородного магнитного поля в апертуре диполя величиной до 3Т.

5. Для широкого класса сверхпроводящих магнитов выполнен анализ влияния формы ферромагнитного экрана и эффекта его насыщения на качество поля.

6. Во всех рассмотренных случаях проанализированы различия между трехмерными расчетами и расчетами, выполненными в приближении двумерной постановки задачи. Показана необходимость исследования пространственных характеристик полей особенно для магнитов с относительно небольшой длиной.

7. Существенно расширен комплекс программ MAGSYS, предназначенный для численного моделирования трехмерных магнитостатических полей и анализа нелинейных эффектов в магнитах электрофизических установок. С его помощью выполнен цикл расчетно-теоретических исследований сверхпроводящих магнитных систем, на основании которых сформулированы практические рекомендации по конструированию прецизионных СП магнитов.

8. На многочисленных примерах сравнения расчетов с экспериментальными данными показано, что точность расчетов, проводимых с

использованием комплекса программ MAGSYS, достаточна для проектирования и создания магнитов большинства электрофизических установок.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Shelaev I.A.,...Baldin A.M., Borisovskaja Z.V. et al. Three Prototype Cells of SC Magnet System Proc. IX Intern. Cryogenic Engineering Conf., Kobe, Japan, 11-14 May 1982, Tokyo, 1982, p.213.

2. Борисовская З.В., Ворожцов С.Б., Дударева Т.Н. Расчеты трехмерных магнитостатических полей по программе BUNZD, ОИЯИ, 9-81-304, Дубна, 1981.

3. Борисовская З.В., Ворожцов С.Б., Дударева Е.Н., Шелаев И.А., Юдин И.П. Трехмерное распределение поля в сверхпроводящем диполе, ОИЯИ, Р9-81-63, Дубна, 1981.

4. Борисовская З.В., Алфеев В.С., Ворожцов С.Б., Донягин А.М., Лобанов В.И., Шелаев И.А. Трехмерный расчет элементов магнитной системы сверхпроводящего синхротрона, ОИЯИ, 9-84-523, Дубна, 1984.

5. Shelaev I.A...Borisovskaja Z.V... et al. Design Features of a Model Superconducting Synchrotron of JINR. Proc. 12 Intern. Conf. on High-Energy Accelerators, Fermilab, Aug. 11-16, 1983, Batavia, Illinois, 1983, p. 416.

6. Борисовская З.В., Донягин А.М., Смирнов А.А., Шелаев И.А. Исследование нелинейностей магнитного поля сверхпроводящего диполя НУКЛОТРОНа. ОИЯИ, 9-86-714, Дубна, 1986.

7. Борисовская З.В., Жидков Е.П., Смирнов А.А., Смирнова Л.А., Шелаев И.А. Численное моделирование магнитного поля сверхпроводящих квадрупольей для НУКЛОТРОНа. ОИЯИ, Р9-88-25, Дубна, 1986.

8. Борисовская З.В., Жидков Е.П., Куц И.В., Полякова Р.В., Шелаев И.А., Юдин И.П. Численное моделирование двумерного магнитного поля 3 Т СП диполя с железом. ОИЯИ, Р11-83-893, Дубна, 1983.

9. Shelaev I.A., Borisovskaja Z.V., Lobanov V.I., Yudin I.P. 3T superconducting dipole magnet with a highly homogeneous field. EPAC, Rome, June 7-11, 1988, p.67.

10. Борисовская З.В., Жидков Е.П., Смирнова Л.А., Шелаев И.А., Юдин И.П. Влияние разбросов характеристик магнитов и линз на параметры траекторий частиц в установке СПИН. Сообщение ОИЯИ, 9-84-522, Дубна, 1984.

11. Борисовская З.В., Ворожцов С.Б., Дударева Т.Н. Расчет сверхпроводящих магнитных систем ускорителей методом объемных интегральных уравнений, Р9-83-753, Дубна, 1983.

12. Борисовская З.В., Ворожцов С.Б., Калинин М.Б., Сергеева Н.В. *MAGSYS* – комплекс программ по расчету трехмерных магнитостатических полей для циклотронных и синхротронных магнитных систем. Б1-9-85-232, Дубна, 1985.

13. Шелаев И.А., Борисовская З.В., Лобанов В.И., Юдин И.П. Дипольный электромагнит. А.С. СССР №1409111 от 9.01.86 года, 1988, стр.4.

Цитируемая литература других авторов:

14. Акишин П.Г., Ворожцов С.Б., Жидков Е.П. Численные эксперименты по применению метода интегральных уравнений к решению трехмерных магнитостатических полей. В кн.: Труды совещания по программированию и математическим методам решения физических задач. ОИЯИ, Д10, 11-11264, Дубна, 1978.

15. Василишин Б.В., Иссинский И.Б., Михайлов В.А., Таровик М.Н. Расчет магнитной структуры НУКЛОТРОНа. ОИЯИ, Р9-86-512, Дубна, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел  
12 июня 1990 года.