

28808

А-58

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

11-93-157

С. Лима Монтенегро

УДК 51-73:537

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ
НЕЛИНЕЙНЫХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Специальность: 05.13.16 — применение вычислительной
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
техники и математических методов в научных
исследованиях (по отраслям наук)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1993

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации.

Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

кандидат технических наук И. П. Юдин
кандидат физико – математических наук
Р. В. Полякова

Официальные оппоненты:

доктор физико – математических наук В. К. Федянин
кандидат физико – математических наук С. Н. Андрианов

Ведущее научно – исследовательское учреждение:

Университет Дружбы народов, г. Москва.

Автореферат разослан " 11 " мая 1993г.

Защита диссертации состоится " 11 " июня 1993г.

в " 10³⁰ " часов на заседании Ученого совета Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ, г. Дубна, Московской области,

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

Кандидат физико – математических наук

Иван
З. М. Иванченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

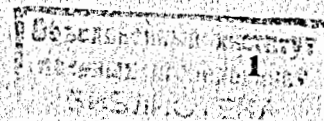
Актуальность

Под компьютерным исследованием физических явлений или системы подразумеваем построение математической модели, описывающей явление или систему, создание численного алгоритма и реализация его в виде комплекса программ на ЭВМ с включением системы графических программ для цветной и обычной одноцветной визуализации полученных численных результатов. С появлением современных компьютеров изменилось само понятие, что означает решить задачу. В это понятие входит как численное решение уравнений, описывающих явление или систему, а также возможность графического исследования результатов решения с широким использованием удобного для работы сервиса, например, с помощью баз данных и специальных оболочек в виде систем, основанных на знаниях – экспертных систем.

Разработка экспертной системы в применении к решению с помощью компьютеров важных физических задач является актуальной современной проблемой. При этом исходная проблема разбивается на подзадачи, каждую из которой можно решать независимо друг от друга, но подзадачи могут взаимодействовать, в результате чего решение одной из них зависит от решения остальных. Для реализации всего процесса требуется исследовать и создать интегрированную экспертную систему, базирующуюся на знаниях и взаимосвязи. Блок-схема такого процесса включает следующие основные этапы:

1. Физическая постановка задачи.
2. Построение математической модели задачи.
3. Моделирование различных вариантов физического явления или системы.
4. Выбор оптимального варианта.
5. Проверка выбранного решения.

Магнитные системы, т.е. системы, образованные токами, присутствуют в природе на самых различных уровнях: это и магниты



огромных ускорительных установок, это и атомы, например, кристаллической решетки ферромагнетика и, наконец, это и сами элементарные частицы при рассмотрении их структуры, и т.д. Исследование состояния магнитных систем представляет интерес прежде всего и потому, что они описываются нелинейными уравнениями, численное решение которых стало возможным лишь с появлением компьютеров.

Существование нетривиальных топологических конфигураций, нелинейных моделей в $(2+1)$ – мерном пространстве, привлекает внимание исследователей в связи с объяснением таких экзотических явлений планарной квантовой физики, как высокотемпературная сверхпроводимость и квантовый эффект Холла. С другой стороны, открытие локализованных солитонов в $(2+1)$ – мерии и исследование их богатой динамики в рамках модели Деви – Стюартсона показывает, что они могут моделировать неупругие процессы рассеяния квантовых частиц, такие, как рождение и аннигиляция, слияние и распад, а также взаимодействие с виртуальной частицей. В связи с этим, а также с построением многомерной топологической модели магнетика, допускающего билинеаризацию, изучение динамики вихрей в $(2+1)$ – мерии представляет несомненный интерес.

Основным инструментом современной экспериментальной физики атомного ядра и элементарных частиц более полувека служат ускорители заряженных частиц. Существующие ускорительные установки в СНГ и за рубежом (например, в их числе и Куба) постоянно модернизируются, сооружаются новые ускорители.

Создание новых магнитных систем физических установок и реконструкция действующих является сложной инженерно – физической проблемой. Формирование требуемого магнитного поля магнитной системы фактически является нелинейной обратной задачей магнитостатики, решение которой в каждом конкретном случае сводится к решению ряда сложных нелинейных математических задач, в том числе и обратных, относящихся к классу некорректных.

В большинстве случаев единственная возможная математического моделирования физических систем и процессов состоит в разработке численных алгоритмов и реализации последних на ЭВМ.

Целью настоящей диссертации является

1. Разработка численных алгоритмов для моделирования неко-

торых нелинейных магнитных систем и реализация их на ЭВМ в виде комплексов программ, в которые составной частью входят системы графических программ для визуализации полученных результатов.

2. Разработка варианта экспертной системы [1] – [4] с подключением современных средств цветной графики и средств для работы с базами данных INPUT, OUTPUT и TEMPORARY для численного исследования магнитных систем, обработки их и принятия оптимального решения.
3. Создание комплекса программ КПММС – 1.0 в виде библиотеки программ с включением в неё выше названного варианта экспертной системы для моделирования магнитных установок на базе ПЭВМ, ЭВМ VAX и ЕС-1061.
4. Выполнение конкретных работ, связанных с изучением следующих магнитных систем:

- системы Ишимори, описывающей в частности состояние ферромагнетика солитонно-подобными решениями [5] – [6],

а также описание и формирование магнитного поля в дипольных магнитах с прямоугольной апертурой, которые широко используются в современной ускорительной технике, а именно

- математическое моделирование магнитного поля магнитов СП – 40 и МС – 12 [7] – [9],
- моделирование безжелезного дипольного магнита [10], [11].

Научная новизна работы

1. Разработан комплекс КПММС – 1.0 программ для исследования двумерных и некоторого класса трёхмерных магнитных систем на базе известных программ POISSON, RELAX3D и GFUN3D. В комплекс программ включены также программа интеллектуальной поддержки (экспертная система) принятия решений для оптимального выбора конфигураций магнитной

системы, программа полиномиального представления компонент магнитного поля с целью использования для изучения динамики заряженных частиц и программа КОБРАМ – решение обратной задачи магнитостатики для некоторого класса безжелезных магнитных систем (двумерный случай). С помощью предлагаемого комплекса программ решён ряд важных практических задач по модернизации и усовершенствованию магнитных систем установок ЭКСЧАРМ, ГИПЕРОН и КРИОН – С.

2. С помощью программы RAW впервые изучено графически семейство односолитонных решений с тривиальной топологией и исследованы его свойства.
3. Используя компьютерную графику RAW, впервые проанализирована динамика топологически нетривиальных (вихревых) решений интегрируемой модели магнетика Ишимори.
4. С помощью комплекса программ КПММС – 1.0 смоделирован магнит СП – 40 установки ЭКСЧАРМ и магнит МС – 12 установки ГИПЕРОН. Даны сравнения однородности магнитного поля по величине $\frac{\Delta B}{B_0}$ (B_0 – поле в центре апертуры) для различных возможных конфигураций этих магнитов. Предложены конфигурации к реализации, для которых величина $\frac{\Delta B}{B_0} < 1\%$ в 80% рабочей области магнита, что даёт высокую разрешающую способность спектрометра и поэтому удовлетворительно для проведения физических экспериментов на установках.
5. Предложен численный алгоритм решения некоторого класса нелинейных обратных задач магнитостатики для безжелезных магнитных систем, с помощью которого выбрана конфигурация безжелезного сверхпроводящего диполя с прямоугольной апертурой, однородность поля которого составляет $10^{-5} \div 10^{-6}$.

Практическая ценность работы

1. Разработан единый подход компьютерного исследования некоторых магнитных систем, состоящий из математического

описания системы, реализации модели в виде численных алгоритмов и программ на ЭВМ, моделирования конкретных физических задач с помощью этих программ и визуализации для анализа полученных численных результатов.

2. Для магнитной системы Ишимори, СП – 40, МС – 12 и сверхпроводящей безжелезной магнитной системы построен численный алгоритм исследования и получены численные результаты. На базе численных расчётов и графического исследования численных результатов впервые дан анализ вихревых решений интегрируемой модели магнетика Ишимори, а также даны рекомендации по формированию реальной конфигурации магнитной системы для СП – 40, МС – 12 и безжелезного дипольного магнита.
3. Проведённые исследования показали, что созданное программное обеспечение можно применять для широкого круга задач по исследованию и формированию магнитных систем, описанных в работе.
4. С помощью разработанного комплекса программ смоделированы четыре реальные конфигурации магнита СП – 40 и три конфигурации магнита МС – 12.

Апробация работы

В основу диссертации легли работы, выполненные в ОИЯИ с 1989г. по 1993г.

Результаты диссертации докладывались на международных конференциях:

- Нелинейные эволюционные уравнения и динамические системы. Международная конференция, 6-17 июля, 1992, Дубна, ОИЯИ,
- XIII Собрание по ускорителям заряженных частиц, 13 – 15 октября, 1992 г., Дубна, ОИЯИ,

на научных семинарах отдела вычислительной математики ЛВТА и в НЭО N1 ЛСВЭ ОИЯИ.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 работах, в том числе в трудах выше названных конференций, в кратких сообщениях ОИЯИ и в виде сообщений и препринтов ОИЯИ.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, содержит 146 страниц машинописного текста, 147 рисунков и 10 таблиц, список литературы, насчитывающий 156 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении даётся краткий обзор по проблемам математического моделирования нелинейных задач, связанных с численным моделированием магнитных систем, изложены результаты диссертации по главам.

Рассматриваются конкретные магнитные системы, каждая из которых математически описывается нелинейными уравнениями.

Магнитная система Ишимори описывается нелинейным уравнением Шрёдингера, система СП – 40 и МС – 12 описываются уравнением Максвелла, а безжелезый магнитный диполь – нелинейным интегральным уравнением Фредгольма I-го рода.

Для численного моделирования каждой из этих систем предлагаются численные алгоритмы, на базе которых созданы комплексы программ, использовавшиеся для их численного моделирования. Для решения нелинейных обратных задач магнитостатики рассматриваются два подхода:

- решение набора прямых задач с последующей визуализацией результатов,
- решение интегрального уравнения Фредгольма I-го рода численным методом, разработанным на базе теории по Тихонову для решения некорректных задач.

В первой главе диссертации рассматриваются свойства локализованных решений некоторых точно-решаемых систем уравнений, связанных с магнитными системами: это в первую очередь различные типы нелинейного уравнения Шрёдингера и классические варианты уравнений, описывающих спиновые модели Гейзенберга. Первое из них, так называемое, нестационарное линейное уравнение Шрёдингера (НЛУШ)

$$[i\partial_t - \partial_x^2 + U(x,t)]\Psi(x,t,k) = 0, \quad (1)$$

с помощью которого могут быть построены локализованные решения уравнения Деви-Стюартсона.

Второе уравнение

$$[i\partial_t - \partial_x^2 + iU(x,t)\partial_x]\Psi(x,t,k) = 0, \quad (2)$$

которое мы будем называть нестационарным деривативным уравнением Шрёдингера, оказывается полезным при нахождении солитонов системы Ишимори, описывающей ориентационную динамику спина единица:

$$\vec{S}_t(x,y,t) + \vec{S} \times (\vec{S}_{xx} + \vec{S}_{yy}) + \varphi_x \vec{S}_y + \varphi_y \vec{S}_x = 0 \quad (3)$$

$$\varphi_{xx} - \varphi_{yy} + 2\vec{S} \cdot (\vec{S}_x \times \vec{S}_y) = 0, \quad (4)$$

где $\vec{S} = (S_x, S_y, S_z)$, $\vec{S}^2 = 1$ и $\varphi(x,t)$ является искомой функцией.

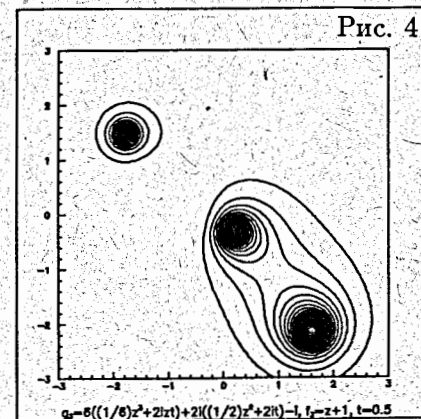
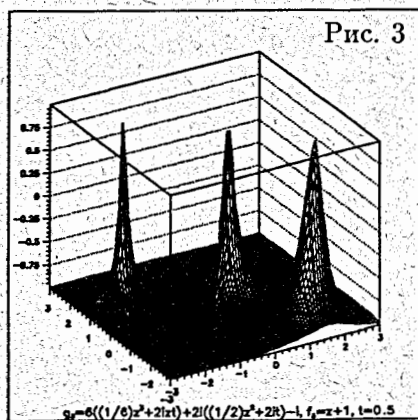
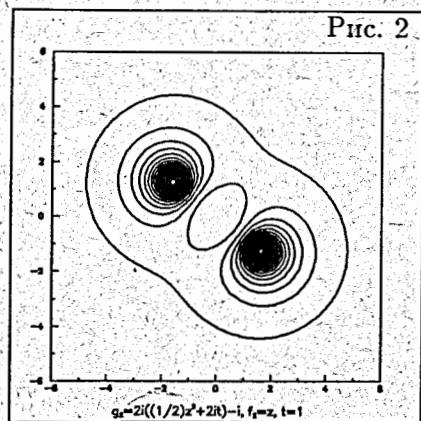
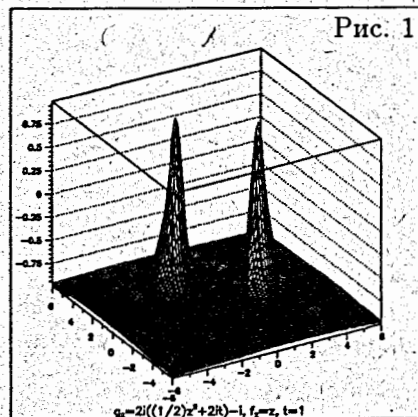
В последние годы было выяснено, что наиболее интересные с математической точки зрения (однако, не менее интересные с точки зрения физических приложений) (2+1) – мерные системы имеют локализованные или солитонные решения, которые могут быть построены специальным образом из решений нестационарных линейных уравнений Шрёдингера.

Открытие локализованных солитонов в (2+1) – мерии и исследование их богатой динамики в рамках модели Деви – Стюартсона показывает, что они могут моделировать неупругие процессы рассеяния квантовых частиц, такие как рождение и аннигиляция, слияние и распад, а также взаимодействие с виртуальной частицей.

Аналитическое изучение модели (3) – (4) указывает на наличие в её рамках локализованных состояний как с тривиальной (солитоны), так и нетривиальной (вихри) топологией. Взаимодействие солитонов между собой и с вихрями, а также вихрей между собой, представляет интерес и с математической и с прикладной точек зрения. В силу же интегрируемости модели Ишимори такое взаимодействие может быть исследовано детально, а сама модель представляет собой аппарат для изучения динамики низкоразмерных топологически нетривиальных конфигураций. Все это делает модель Ишимори весьма привлекательной для большого круга специалистов как физиков, так и математиков. Ниже мы рассмотрим некоторые простейшие локализованные структуры в рамках данной модели, причем разделим их “условно” на топологически тривиальные и нетривиальные. Изложен метод построения локализованных

солитоноподобных потенциалов для обоих типов нестационарных линейных уравнений Шрёдингера, допускающих отыскание много-солитонных решений как в рамках модели Деви – Стюартсона, так и модели Ишимори.

С помощью этой методики получено семейство односолитонных решений с тривиальной топологией и исследованы его свойства, в частности, с помощью компьютерной графики системы PAW (см. рис.1-4).



Изучаются также свойства одно и многосолитонных состояний с нетривиальной топологией (вихрей). Особый интерес здесь представляют взаимодействия различных вихрей.

Используя компьютерную графику PAW, проанализирована динамика топологически нетривиальных, вихревых решений интегрируемой модели магнетика Ишимори. В диссертации содержится около 130 рисунков типа рис. 1 – рис. 4.

В результате выявлены следующие характерные особенности таких взаимодействий:

1. Хотя амплитуды вихрей в процессе взаимодействия не меняются, их форма претерпевает изменения связанные с несохранением намагниченности системы.
2. Скорость вихрей меняется со временем.

При этом, ассоциированное с функцией тока поле скоростей, носит типичный характер гидродинамических вихрей, сопровождающих магнитные вихри.

Во второй главе диссертации описываются постановки задач численного моделирования магнитных систем, ускорителей и алгоритмы их решения.

Известно, что в достаточно общем случае задача магнитостатики, состоящая в нахождении магнитного поля по заданным источникам сводится к решению уравнения Максвелла

$$\begin{cases} \text{rot } \vec{H} = c_0 \cdot \vec{j}, \\ \text{div } \vec{B} = 0, \\ \vec{B} = \mu_0 \cdot \mu(|\vec{B}|^2) \cdot \vec{H}, \\ \lim_{|x| \rightarrow \infty} H(x) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где \vec{B} – вектор магнитной индукции,
 \vec{H} – вектор напряжённости магнитного поля,
 \vec{j} – вектор объёмной плотности тока, c_0 – константа, зависящая от системы единиц (для системы СИ $c_0 = 4\pi$),
 μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, $\mu = \mu(|\vec{B}|^2)$ – магнитная проницаемость ферромагнетика. Уравнения (5), дополненные условиями непрерывности нормальной составляющей вектора \vec{B} и касательной составляющей вектора \vec{H} на границах раздела различных

сред

$$\begin{cases} (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) \cdot \vec{n}_1 = 0, \\ (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \times \vec{n}_1 = \vec{0}, \end{cases} \quad (6)$$

где \vec{n}_1 – нормаль к поверхности раздела, однозначно определяют искомые физические характеристики магнитного поля.

Используя соотношение $\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$, где \vec{A} – вектор потенциал, получим

$$-\text{div} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (7)$$

Уравнение (7) для двумерного случая является нелинейным уравнением Пуассона, в котором μ зависит от величины \vec{B} . Ограничимся решением двумерной задачи, что предполагает независимость всех переменных от координаты z . Величины \vec{B} и \vec{H} связаны между собой соотношением $\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B}$, где \vec{H} – вектор напряженности магнитного поля.

Аналитические решения магнитостатической задачи возможны только в специальных случаях, что привело к развитию численных методов решения.

Среди численных методов анализа магнитных полей большое распространение получил метод конечных разностей, который даёт решение в точках сетки, покрывающей заданную расчетную область.

За последние годы накопилось немало программ численного анализа магнитных полей нелинейных магнитных систем, краткие характеристики которых также приводятся во 2-ой главе. Основные требования к таким системам программ должны быть следующие:

1. максимальная простота общения с системой программ,
2. сравнительно малые времена счета для одного варианта магнитной системы, так как при проектировании новых магнитных систем приходится, как правило, просчитывать десятки вариантов магнитной системы,
3. система программ должна иметь выход на экран, чтобы вести контроль задачи,
4. максимальная простота описания геометрии магнитной системы.

В начале 70-х годов хорошо зарекомендовала себя система программ POISSON – математического моделирования двумерных магнитостатических задач, написанная на языке Фортран, системы программ GFUN3D и RELAX3D – математическое моделирование трёхмерных магнитостатических задач. Эти системы программ и вариант экспертной системы положены в основу вычислительного комплекса программ КПММС – 1.0. С помощью этого комплекса программ проводится анализ конкретных магнитных систем, в том числе решается задача математического моделирования некоторых модификаций спектрометрического магнита СП – 40 и МС – 12, решение которой обсуждается в этой главе. Обсуждаются результаты численных расчётов и графических представлений этих результатов с целью выбора реальной конфигурации магнита СП – 40 и МС – 12 на основе проделанного анализа.

После проведения измерений магнитного поля или численных расчётов в некоторых узлах сетки возникает проблема восстановления магнитного поля в произвольной точке рабочей области. Особый интерес представляет процедура восстановления краевого рассеянного поля магнита, т.к. измерения на торцах магнита обычно не проводятся вплоть до точек, в которых величина магнитной индукции настолько мала, что не влияет на динамику частиц пучка. Изучению этого вопроса посвящен параграф 3 главы 2, где анализируется магнитное поле модифицированного магнита СП – 40 многочастичного спектрометра ЭКСЧАРМ. Измеренное или вычисленное в некоторых узлах сетки магнитное поле приближено некоторыми аппроксимирующими функциями, а именно полиномами от x, y, z с небольшим набором коэффициентов для программ, моделирующих процесс транспортировки частиц. Эта аппроксимация не требует значительных объёмов машинной памяти и времени и в то же время даёт информацию о распределении магнитного поля в той части рабочей области, где измерения или расчёты не проводились. В работе приведены оценки точности проведенной аппроксимации полиномами.

В третьей главе диссертации описывается решение задачи моделирования магнитного поля магнитных систем, которое сводится к отысканию конфигурации системы, создающей заданное магнитное поле. Такая задача является обратной задачей магнитостатики. Выбор оптимальной конфигурации системы можно про-

водить также на основании полученных численных расчетов и экспериментального моделирования. Хорошо выполненные численные расчеты оказываются достаточными для проведения численного изучения влияния различных конструктивных параметров магнита на величину и форму поля.

На практике большой интерес представляет возможность конструирования безжелезной магнитной системы, так как отсутствие железа в системе выгодно экономически. Математическое моделирование таких задач приводит к решению обратной задачи магнитостатики, когда по заданному магнитному полю необходимо определить параметры системы – токи, или геометрические характеристики их, или и то и другое одновременно.

Такая задача в общем виде сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма I-го рода:

$$H(z) = \int_S J(s)G(z, s)ds, \quad (8)$$

где $z \in U$, U – область, в которой задано поле $H(z)$, $s \in S$, S – область расположения элементов магнитной системы, $G(z, s)$ – функция Грина, аналитический вид которой для конкретной магнитной системы обычно известен и нелинейно зависит от геометрии системы и расположения точки, в которой определяется поле.

Задача, когда по заданному магнитному полю $H(z)$ определяется распределение плотности тока $J(s)$ в магнитной системе, геометрия которой известна, является линейной обратной задачей магнитостатики. Математически такая задача сводится к решению линейного уравнения Фредгольма I-го рода.

Если заданное магнитное поле $H(z)$ создается не только распределением плотности тока $J(s)$, но и геометрией источников тока, т.е., путём варьирования координат расстановки их в заданной области S , то такая задача является нелинейной обратной задачей, так как $G(z, s)$ нелинейна относительно z и s .

В этой главе диссертации рассматривается некоторый класс нелинейных обратных задач магнитостатики, для решения которых предлагается метод, позволяющий сравнительно легко преодолеть трудности, связанные с решением плохо обусловленных систем уравнений. На основании предлагаемого метода разработан численный алгоритм решения этого класса обратных нелинейных задач, который реализован в виде комплекса программ на ФОРТРАНе. С по-

мощью предлагаемого метода решён ряд важных обратных задач магнитостатики, возникших при проектировании нового сверхпроводящего ускорителя на 1,5 ГэВ.

Особый интерес представляла задача математического моделирования однородного магнитного поля безжелезного сверхпроводящего диполя с плоской [10] обмоткой. Теоретически известны две конфигурации обмотки безжелезного магнита, обеспечивающие требуемую однородность поля, – в виде пересекающихся эллипсов и цилиндрическая обмотка с косинусоидальным распределением плотности тока. Оба эти варианта предполагают размещение витков обмотки на поверхности второго порядка, что вызывает значительные технологические трудности при изготовлении обмоток. Предлагаемая геометрия обмотки технологически более проста и удобна в реализации. Кроме того, прямоугольную апертуру магнита значительно легче согласовать с требованиями к поперечным размерам камеры ускорителя. С использованием разработанного метода решения обратных нелинейных задач магнитостатики удалось выбором расположения витков обмотки обеспечить однородность магнитного поля диполя вплоть до 10^{-5} .

В этой главе показана эффективность применения этих алгоритмов к решению магнитостатических задач. На практике невозможно выполнить магнитную систему с той точностью, которая получается в результате численных расчетов на ЭВМ. Если, например, результаты вычислений получены с шестью верными знаками, то при реализации невозможно создать установку с такой точностью (в силу ограниченных технических возможностей). Если технические возможности позволяют установку витков с током с точностью 10 – 20 мкм, то возникает вопрос, какое влияние оказывает округление полученных результатов до трех знаков на однородность магнитного поля. На основании компьютерного моделирования такой магнитной системы предложена конфигурация безжелезного диполя к реализации, для которой однородность поля составляет не менее 10^{-3} с учётом ошибок округления при реализации. (см. рис. 5)

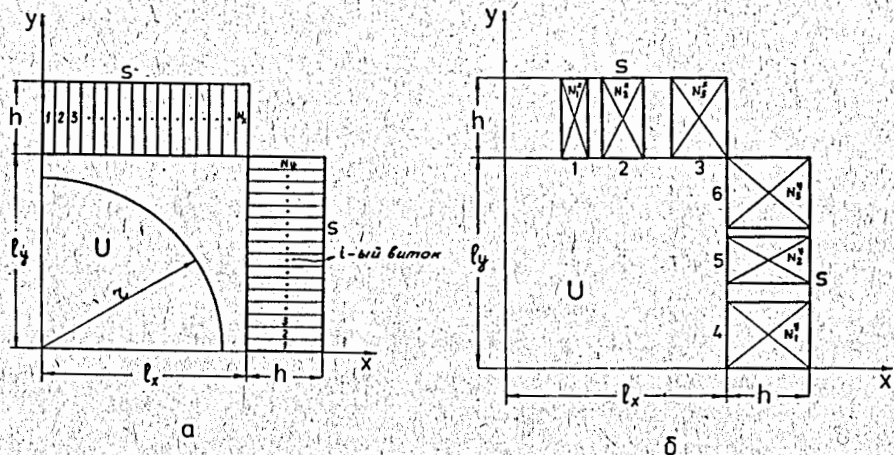


Рис 5а,б: Конфигурация СП диполя с плоской обмоткой;
б — одна из возможных реальных конфигураций СП диполя

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Впервые с помощью цветной графики изучены нестационарные односолитонные решения, полученные с помощью решения системы уравнений Шрёдингера для магнетика Ишимори. Приведены результаты визуального представления солитонных решений в рамках модели Ишимори II.
2. С помощью графического представления численных результатов дан анализ динамики вихревых решений интегрируемой модели магнетика Ишимори. Показано, что в отличие от обычных солитонов:

- форма солитона претерпевает изменения, связанные с несохранением намагниченности системы, хотя амплитуды вихрей в процессе взаимодействия не меняются,
- скорость вихрей меняется со временем.

3. На базе системы программ POISSON (расчёта двумерных полей), GFUN3D и RELAX3D (расчёта трёхмерных магнитных полей) разработан комплекс программ для численного расчёта магнитных полей и графического описания численных результатов с помощью систем программ PAW, SURFER, GRAPHIC и LATEX с использованием средств цветной графики.
4. С помощью этого комплекса программ создан банк данных для широкого набора конфигураций исследуемых магнитных систем, что значительно облегчает процесс их проектирования и создания.
5. Проведено исследование четырёх конфигураций магнита СП – 40 установки ЭКСЧАРМ и трёх конфигураций магнита МС – 12. На базе этих численных расчётов создан значительный банк данных конфигураций и даны рекомендации на основе решения обратной задачи магнитостатики для получения однородного поля с точностью до 1% в рабочей апертуре магнита.
6. С помощью аппроксимации полиномами решена задача восстановления магнитного поля в любой точке рабочей области магнита СП – 40 на базе измеренных данных или данных, полученных численным путём. Такое аналитическое представление магнитного поля позволяет эффективно использовать его в задачах транспортировки заряженных частиц и моделировании распадных процессов в установке типа ЭКСЧАРМ, а также для выполнения таких конкретных работ как:
 - Разработка алгоритмов восстановления импульсов частиц, регистрируемых 2-х метровыми пропорциональными камерами.
 - Размещение зеркал для черенковских счётчиков частиц.
7. Разработан вариант экспертной системы, которая использовалась для проектирования спектрометрического магнита СП – 40 и магнита МС – 12, а также для исследования магнитной

системы (модель Ишимори), описывающей состояние ферромагнетика солитоноподобными решениями.

8. На базе численного метода Тихонова регуляризации решения нелинейного интегрального уравнения Фредгольма I-го рода (некорректно поставленная задача) разработан численный алгоритм, который реализован в виде комплекса программ на Фортране, решения некоторого класса нелинейных обратных задач магнитостатики для безжелезных магнитных систем.
9. С помощью этого метода моделировалась система безжелезного сверхпроводящего диполя с прямоугольной апертурой. Разработан вариант реальной конфигурации магнитной системы, для которой получено однородное поле с точностью 10^{-5} .

Работы, положенные в основу диссертации

1. Ф. Фернандес Нодарсе, В. Г. Иванов, Г. Балунова, С. Лима. Примеры разработки интеллектуальных программных систем. Краткие сообщения ОИЯИ №.7[46]-90, стр. 64-73.
2. С. Лима, Р. В. Полякова, Ф. Фернандес Нодарсе, И. П. Юдин. Экспертная система для исследования магнитных систем. Препринт ОИЯИ P11-92-509, Дубна, 1992, 16 с.
3. С. Лима, Р. В. Полякова, Ф. Фернандес Нодарсе, И. П. Юдин. Экспертная система для задач физики ускорителей. (В сборнике аннотаций XIII Совещания по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, Дубна, 13-15 октября, 1992г.), ОИЯИ Д9-92-380, Дубна, 1992, стр. 132 (доклад на совещании по ускорителям, 13-15 октября 1992г., Дубна, ОИЯИ).
4. С. Лима, В. Н. Мельников, Р. В. Полякова, Ф. Фернандес Нодарсе, И. П. Юдин. Использование цветной графики при компьютерном моделировании ускорителей. (В сборнике аннотаций XIII Совещания по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, Дубна, 13-15 октября, 1992г.), ОИЯИ Д9-92-380, Дубна, 1992, стр. 133.

5. С. Лима, В. Г. Маханьков. Нестационарные солитоны в модели Ишимори. Визуализация результатов. Сообщение ОИЯИ P4-92-415, Дубна, 1992, 10 с.
6. С. Лима Монтенегро, О. К. Пашаев. Динамика вихрей модели магнетика Ишимори. Сообщение ОИЯИ P11-92-418, Дубна, 1992, 32 с.
7. Е. П. Жидков, С. Лима, Р. В. Полякова, И. П. Юдин. Математическое моделирование некоторых модификаций спектрометрического магнита СП - 40. Сообщение ОИЯИ, P11-92-490, Дубна, 1992, 14 с.
8. E. P. Zhidkov, S. Lima, V. A. Panacik, R. V. Polyakova and I. P. Yudin. Simulation of the Nonlinear Magnetic Field of the Decay Process Spectrometer. (In Proc. of the NEEDS'92 Conference, 6-17 July 1992, Dubna, JINR), 4 pgs.
9. Д. А. Кириллов, А. Я. Кутов, С. Лима, В. А. Панасик, Р. В. Полякова, И. П. Юдин. Полиномиальное представление компонент измеренного магнитного поля спектрометра ЭКСЧАРМ. Сообщение ОИЯИ P11-92-436, Дубна, 1992, 14 с.
10. E. P. Zhidkov, S. Lima, R. V. Polyakova and I. P. Yudin. Solution of Nonlinear Inverse Problem Using Regularized Iterative Processes for Designing of the Magnetic System. (In Proc. of the NEEDS'92 Conference, 6-17 July 1992, Dubna, JINR).
11. E. P. Zhidkov, S. Lima, R. V. Polyakova and I. P. Yudin. Designing of the magnetic system by the solution of inverse problem. JINR Rapid Communications. No 5[56]-92, Dubna, 1992, pgs.16-29.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 апреля 1993 года.