



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Д - 629

13-80-396

ДОЙНИКОВ
Николай Иванович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

Специальность 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1980

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры имени Д.В.Ефремова .

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник Владимир Иванович Данилов,
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник Владлен Иванович Котов,
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник Валерий Павлович Ильин.

Ведущее предприятие: Институт теоретической и экспериментальной физики

Защита диссертации состоится " " _____ 198 г.
в _____ часов на заседании специализированного совета
Д047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного
института ядерных исследований, г.Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛЯП ОИЯИ.

Автореферат разослан " " _____ 1980 года.

Ученый секретарь
специализированного совета

П.А.Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ. Разработка электрофизической аппаратуры для исследований в области физики высоких энергий и по проблеме управляемого термоядерного синтеза в настоящее время все чаще опирается на детальный анализ магнитного поля. Это объясняется не только повышенным интересом к самому полю, в частности к прецизионности его характеристик, но и уникальностью проектируемых установок, необходимостью оптимизации их конструктивных и эксплуатационных параметров.

В силу геометрической сложности магнитных систем и нелинейности описывающих поле уравнений для изучения его с требуемой полнотой и точностью целесообразно использование методов математического (численного) моделирования. Развитие наиболее рациональных подходов к решению сложных задач и совершенствование отдельных компонентов вычислительного процесса способствует оперативному выполнению проектных работ и повышению эффективности ЭВМ.

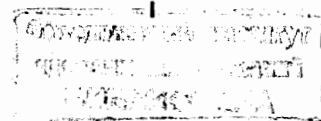
Особого внимания заслуживает моделирование нелинейных пространственных полей. Проблема состоит в нахождении экономичного вычислительного алгоритма.

Наличие в алгоритмах установленных экспериментальным путем приемов и параметров отражается на длительности счета. Задача состоит в том, чтобы канонизировать вычислительный процесс. Интересные возможности обеспечивает метод стабилизации по непрерывному параметру (МСНП)*).

Применение метода нелинейной последовательной верхней релаксации (НПВР) приводит к снижению требований к оперативной памяти ЭВМ. Однако при этом остается актуальной задача оптимизации итерационного процесса.

Важным и актуальным направлением исследований является разработка методов решения обратных задач магнитостатики. В достаточно сложном виде эта задача формулируется в проблеме синтеза магнитной системы поoidalного поля токамака.

* Гавурин М.К. Нелинейные функциональные уравнения и непрерывные аналоги итеративных методов. Изв. ВУЗ'ов. Математика, 1958, № 5(6), с. 18 - 31.



В связи с жесткими требованиями к полю остаются актуальными вопросы его формирования в электромагнитах современных циклических ускорителей заряженных частиц и систем их транспортировки. Численное моделирование должно обеспечить требуемую точность учета особенностей конструкции и эффектов насыщения железа.

Особо важную роль играет численное моделирование в разработке магнитных систем с железом на индукции свыше 2 Т, так как другие методы анализа поля оказываются или слишком приближенными, или практически трудно осуществимыми. Необходимо подчеркнуть, что оптимизация сверхпроводящих магнитных систем должна проводиться с учетом ограничений, связанных с поведением токонесущих элементов в сильных полях.

Диссертация является обобщением работ, выполненных в соответствии с научно-тематическими планами НИИЭФА им. Д.В.Фремова, ИФВЭ, ОИЯИ, ИТЭФ и ИАЭ им. И.В.Курчатова.

ЦЕЛЬ РЕФЕРИРУЕМОЙ ДИССЕРТАЦИИ состоит в разработке методов и методов математического моделирования нелинейных магнитостатических полей, создании на их основе программного обеспечения, выполнении анализа и оптимизации параметров ряда реализованных магнитных систем, а именно:

1) в нахождении рационального подхода к решению линейных и нелинейных пространственных магнитостатических задач, разработке численного алгоритма и обосновании его эффективности [1 + 6];

2) в разработке экономичных численных алгоритмов моделирования линейных и нелинейных двумерных магнитостатических полей и обосновании их эффективности [7 + 9];

3) в развитии МСНП для решения задач магнитостатики [10];

4) в разработке метода решения определенного класса обратных задач магнитостатики [11 + 12];

5) в разработке метода синтеза магнитных систем полоидального поля токамаков [13; 14];

6) в разработке методики численного моделирования самосогласованных краевых задач [15];

7) в создании программного обеспечения, численном моделировании и оптимизации параметров ряда нелинейных магнитных систем: электромагнитов пузырьковых камер [16 + 18], сверхпроводящих электромагнитов [19 + 21], электромагнитов синхротрона ИФВЭ [8] и его отдельных систем [22 + 24], магнитной системы полоидального поля токамака [25].

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

1. Распространены на пространственный случай известные по двумерным расчетам методы генерации нерегулярной сетки *) и численного моделирования на основе модифицированного скалярного потенциала **). Впервые (1970 г.) произведен численный анализ нелинейных полей конкретной магнитной системы.

2. Впервые (1967 г.) осуществлен в численном моделировании конкретных магнитных систем метод НПВР.

3. Предложен алгоритм моделирования, основанный на МСНП и консервативной схеме оквозного счета.

4. Для ряда канонических форм рабочей области предложен метод синтеза магнитной системы [11].

5. Предложен и реализован метод синтеза системы полоидального поля токамака [13].

6. В результате получило развитие перспективное направление — математическое моделирование магнитостатических полей, послужившее методологической основой решения крупной физико-технической проблемы — разработки и создания новой электрофизической аппаратуры для исследований в области физики высоких энергий и по проблеме управляемого термоядерного синтеза.

7. Предложен и обоснован способ коррекции поля в электромагнитах типа "оконной рамы" [28, 29].

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ

1. На базе предложенных методов и разработанных алгоритмов создан комплекс вычислительных программ, пригодный для численного моделирования линейных и нелинейных, двумерных и пространственных полей в общем случае изотропных и анизотропных сред с достаточно произвольной конфигурацией токонесущих и ферромагнитных областей. Программы написаны на языках АКИ, АЛГОЛ, ФОРТРАН и приспособлены к различным типам отечественных ЭВМ. С их помощью выполнены анализ и оптимизация параметров следующих реализованных магнитных систем:

*) Winslow A.M. Numerical solution of the quasilinear Poisson equation in a nonuniform triangle mesh. — Journ. of Comp. Phys., 1966, v.1, No.2, p.149-172.

***) Livingston M.S. and Blewett J.P. Particle Accelerators. — N.Y.: McGraw-Hill, 1962, p.253.

- а) электромагнита пропан-фреоновой камеры СКАТ [16, 17];
- б) электромагнита жидководородной камеры "Людмила" [18];
- в) установки "Гиперон-1" [19, 20];
- г) сверхпроводящего диполя с разрезным магнитопроводом [12, 21];
- д) прецизионных заворачивающих магнитов типа "оконной рамы" с однородным в широком диапазоне индукций полем для системы медленного вывода синхротрона ИФВЭ [29];
- е) электромагнита бустера синхротрона ИФВЭ (с учетом анизотропии стали) [23];
- ж) токамака Т-20 [25, 27].

2. Разработанные численные алгоритмы и созданное на их основе математическое обеспечение используются в ОИЯИ, ИТЭФ, ИЯИ АН СССР и ИЯФ СО АН СССР.

АППРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Результаты диссертации докладывались на Совещании по формированию пучков заряженных частиц высоких энергий (Дубна, 1967 г.); на Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц в 1968, 1970 и 1974 годах; на заседаниях секции № 2 Научного совета АН СССР по комплексной проблеме "Научные основы электрофизики и электроэнергетики" в 1970, 1973, 1978 годах; на IV Всесоюзном семинаре по методам расчета электронно-оптических систем (Новосибирск, 1971 г.); на Международных совещаниях по большим токамакам (Дубна, 1975 г.; США, Принстон, 1976 г.); на Всесоюзной конференции по технике использования сверхпроводимости (Алушта, 1975 г.); на Международных конференциях по магнитной технологии (ИТ-5, Фраскати, 1975 г.; ИТ-6, Братислава, 1977 г.); на Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов (Ленинград, 1977 г.), а также на научных семинарах в ИФВЭ, ИТЭФ, ИАЭ им. И.В.Курчатова, ЛВТА ОИЯИ и НИИЭФА.

ПУБЛИКАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 65 работ; основные результаты содержатся в 30 печатных работах, приведенных в списке литературы.

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ

Работа состоит из введения, пяти глав, заключений и двух приложений; объем - 218 страниц, 95 рисунков, 8 таблиц, список литературы насчитывает 194 наименования.

Введение содержит обоснование актуальности работы, перечень рассмотренных проблем, обоснование структуры диссертации.

В первой главе обсуждается постановка задачи и дается критический обзор различных подходов к её решению. Вторая глава освещает вопросы построения разностных схем. В третьей главе излагаются особенности реализации методов численного моделирования. Проблеме синтеза содержащих ферромагнетик магнитных систем посвящена четвертая глава. В пятой главе рассматриваются вопросы формирования полей и оптимизации параметров конкретных магнитных систем с помощью методов, изложенных в предыдущих главах.

В заключении кратко суммируются основные научные результаты.

В приложения вынесены:

- 1) используемые в расчетах магнитные характеристики стали и их аналитические аппроксимации;
- 2) постановка задачи и особенности методики моделирования квазистационарных импульсных полей.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. ПОСТАНОВКА КРАЕВЫХ ЗАДАЧ МАГНИТОСТАТИКИ

В диссертации рассматриваются методы дифференциальных уравнений.

Прямая задача магнитостатики формулируется следующим образом: требуется найти стационарное магнитное поле векторов \vec{B} или \vec{H} в достаточно произвольной безгистерезисной среде ($B_i = \mu_0 \sum_j \mu_{ij} H_j$) по заданным источникам поля \vec{J}_0 . Магнитные свойства среды описываются тензорным или скалярным представлением магнитной проницаемости μ . Допускается 4 типа областей: $D_I (\mu=1, \vec{J}_0=0)$, $D_{II} (\mu \neq 1, \vec{J}_0=0)$, $D_{III} (\mu=1, \vec{J}_0 \neq 0)$, $D_{IV} (\mu \neq 1, \vec{J}_0 \neq 0)$. В областях D_{II} и D_{IV} учитывается нелинейная зависимость μ от B .

С помощью векторного потенциала \vec{A} ($\nabla \times \vec{A} = \vec{B}$) проблема в общем случае сводится к решению трех нелинейных взаимосвязанных дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка относительно компонент A_i с нулевым условием на бесконечности. На примере модельной задачи показано [2], что этот подход может быть реализован при повышенных требованиях к ЭВМ.

К существенным упрощениям приводит постановка двумерной задачи и переход к бесконечно большой магнитной проницаемости ферромагнетика. Векторный потенциал двумерного поля имеет один коллинеарный с \vec{J}_0 компонент. Если $\mu_{Fe} = \infty$, то область D_{II} выпадает из рассмотрения. Исключения составляют случаи с областями D_{IV} или с отличными от нуля полными токами в областях D_{III} , расположенных в полостях с ограниченным контуром сечения. Граничные задачи при этом формулируются поочередно в областях D_{IV} или D_{II} и в D_I или $D_I \cup D_{III}$.

Решение пространственной задачи значительно облегчается при использовании скалярного потенциала. Здесь имеется три возможности.

Первая состоит во введении потенциала $\varphi^{(m)}$ для описания поля намагниченной среды, так что $\vec{H} = \vec{H}^{(0)} + \nabla \varphi^{(m)}$. Для решения уравнения относительно $\varphi^{(m)}$ требуется подробная информация о вакуумном поле $\vec{H}^{(0)}$. Хотя его определение не вызывает сомнений, все же конкретные расчеты представляются весьма трудоемкими.

Вторая возможность связана с описанием \vec{H} в D_{II} с помощью одного скалярного потенциала φ . В результате вся рассматриваемая область разбивается на две части, $D_I \cup D_{III}$ и D_{II} , решения в которых должны быть состыкованы.

Третья возможность основывается на применении модифицированного скалярного потенциала v , удовлетворяющего уравнению

$$\sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu_{ij} \frac{\partial v}{\partial x_j}) = - \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu_{ij} P_j), \quad (1)$$

где компоненты вектора \vec{P} являются решением уравнения

$$\nabla \times \vec{P} = \vec{J}_0. \quad (2)$$

При этом $\vec{H} = \nabla v + \vec{P}$. (3)

Решение уравнения (2), в отличие от $\vec{H}^{(0)}$, может быть выражено через однократные интегралы от компонентов \vec{J}_0 , вычисление которых не вызывает затруднений в каждом итерационном цикле. С другой стороны, благодаря универсальности уравнения (1) может быть организован сквозной счет.

Этот прием получил широкое распространение в численном анализе нелинейных двумерных полей. Автор совместно с А.С.Симаковым впервые применил его в численном моделировании нелинейных пространственных полей [1,3+5].

В случае магнитных систем с цилиндрическими экранами трехмерную задачу удается свести к двумерной, если предположить $\mu_{Fe} = \infty$. Сравнительно легко обеспечиваются условия, при которых $\vec{P} \neq 0$ лишь в D_{II} и $v = 0$ на границе областей D_I и D_{II} [6].

Метод последовательных приближений позволяет выполнить прецизионные исследования при умеренных требованиях к оперативной памяти и быстродействию ЭВМ. Особенно эффективен этот метод в анализе так называемых безззорных систем, содержащих области D_{IV} . Весьма сильное влияние на поле малых воздушных участков не позволяет применить схему сквозного счета.

Решение нелинейных интегральных и обыкновенных дифференциальных уравнений успешно осуществляется МСНП*). Применительно к нелинейным задачам магнитостатики этот метод позволяет оптимизировать вычислительный процесс [10].

Согласно МСНП нахождение A в случае осесимметричной системы с изотропным ферромагнетиком сводится к решению уравнения

$$F(r, z, t) = L(r, z, t) + \dot{L}(r, z, t) = 0, \quad (4)$$

где $L(r, z, t) = \frac{\partial}{\partial r} \left[g \frac{1}{r} \frac{\partial (rA)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(g \frac{\partial A}{\partial z} \right) + \mu_0 J_0 = 0$, (5)

$$g = \frac{1}{\mu} = g(B^2(A)), \quad A = A(r, z, t),$$

при граничном $\lim_{x \rightarrow \infty} \dot{A} = 0$ и начальном $A(r, z, 0) = A_0(r, z)$ условиях.

Уравнение (4) относительно \dot{A} оказывается линейным. По известным $A(t)$ и $\dot{A}(t)$ можно перейти к моменту $t + dt$, так что нахождение $A(r, z) = \lim_{t \rightarrow 0} A(r, z, t)$ сводится к бесконечной последовательности линейных задач. При сходных условиях в упомянутой ранее работе Е.П.Мидкова и др. показано, что при точном решении краевой задачи относительно \dot{A} и $dt \rightarrow 0$ приближенное распределение A стремится к точному независимо от $A_0(r, z)$.

*) Мидков Е.П., Макаренко Г.И., Пузынин И.В. Непрерывный аналог метода Ньютона в нелинейных задачах физики. - Физ. элем. част. и ат. ядра, 1973, т. 4, № 1, с. 127 - 166.

Задачи магнитостатики в принципе сводятся к рассмотрению "открытых областей" с граничным условием на бесконечности. Необходимое при использовании разностных схем исключение "проблемы бесконечности" может быть осуществлено различными путями, приводящими либо к точному, либо к приближенному решению.

Среди первых выделяется своей универсальностью способ, базирующийся на согласовании краевого условия на границе ограниченной области с получаемым решением. В ходе итерационного процесса граничные значения искомой функции эпизодически приводятся в соответствие с определяемыми "фиктивными" источниками поля [15].

Исходя из асимптотики поля на больших расстояниях от источников формулируется приближенное краевое условие III рода. Теоретически обосновывается точность расчета, обусловленная выбором границы исследуемой области [27].

Большинство рассмотренных разностных схем базируется на декартовой сетке. С помощью различных вычислительных приемов область их применения может быть распространена на системы со сложной структурой. Однако известно, что особенности геометрии на плоскости наиболее тщательно учитываются на нерегулярной треугольной сетке, правда, со значительными трудностями в реализации. В пространственном случае определенный интерес представляет нерегулярная сетка из тетраэдров, метод генерации которой обоснован в диссертации.

Использование расчетной модели, согласно которой $\mu = const$ в пределах каждой ячейки, и интегродифференциального или вариационного методов *) позволяет существенно упростить вычислительный алгоритм и уменьшить погрешности расчета, связанные с учетом скачков μ и с усреднением этой величины. В случае линейной интерполяции потенциала в пределах ячейки оба метода построения разностных схем приводят к одинаковым результатам.

В конечных разностях также сформулирована задача магнитостатики применительно к МСНП [10].

*) А.А. Самарский. Введение в теорию разностных схем. - М.: Наука, 1971. - 552 с.

Вопросы снижения требований к оперативной памяти ЭВМ и сокращения длительности счета являются определяющими при выборе путей реализации методов численного моделирования. В связи с этим основное внимание акцентируется на методе НПВР. Получены вычислительные алгоритмы для случаев применения а) пространственной [5] и б) двумерной [9] декартовой сетки, в) нерегулярной треугольной сетки, учета магнитной анизотропии стали [22] и анализа равновесных плазменных конфигураций в токамаке [13].

В противовес двухшаговому методу Эрдели обсуждается возможность МСНП. Исследована в теоретических и реализована в практических расчетах схема оптимизации вычислительного процесса. Показано, что число временных слоев слабо зависит от параметра, характеризующего точность решения линейных задач (рис. 1), так что она может быть задана весьма грубой. Другая возможность оптимизации связана с введением в алгоритм несложной процедуры, обеспечивающей наибольшую скорость сокращения невязок при переходе между соседними временными слоями (рис. 2).

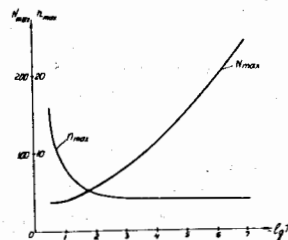


Рис. 1. Зависимость полных чисел линейных итераций (N_{max}) и временных слоев (N_{s}) от точности решения линейных задач T .

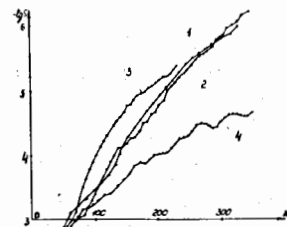


Рис. 2. Текущая точность решения в зависимости от полного числа линейных итераций. • - положение временного слоя. $T^{(n)}$: 1 - 0,5; 2 - 0,75; 3 - 1,0.

Значительное ускорение сходимости и уменьшение длительности расчета методом НПВР гарантируют использование оптимального значения параметра верхней релаксации ω_{opt} . Строгое определение ω_{opt} представляет самостоятельную задачу. Известен (*) приближенный способ нахождения ω_{opt} в области $D_I \cup D_{III}$. При этом в D_{II} этот параметр подбирается экспериментально или задается на основе предыдущих расчетов.

Однако, как показывают расчеты конкретных магнитных систем [26], может быть рекомендована схема оптимизации ω для всей области, включая нелинейные участки. По существу эта схема является обобщением схемы Винслоу.

Особенность предлагаемой схемы состоит в том, что величины ω_{opt} определяются раздельно в областях $D_I \cup D_{III}$ и D_{II} , а на их границе задается их среднее значение. При этом существенную роль играет коррекция значений ω_{opt} в случае расходимости итерационного процесса. Рассмотрены различные схемы коррекции (см. рис. 3, б) (**): I — при обнаружении расходимости значения ω_{opt} не изменяются; II — при том же условии они уменьшаются на заданные величины; III — эти сокращения производятся лишь по прошествии заданного числа (обычно трех) итерационных циклов, сопровождающихся расходимостью. На этом же рисунке для сравнения приводятся данные по сходимости, полученные без оптимизации ω (кривая 4) и в расчете с помощью МСНП (кривая 5). Предпочтительна схема III в методе НПВР и МСНП.

Схема III прошла экспериментальную проверку на большом числе расчетов различных магнитных систем. Лишь в случае системы с замкнутым железным магнитопроводом она оказалась недостаточно эффективной на низких уровнях невязок при $\mu_{Fe} \gg 1$. Все же её следует применять, так как получаемые в меру большие значения ω_{opt} позволяют весьма быстро достигнуть расчетного уровня поля в магнитопроводе. В дальнейшем сходимость обеспечивается схемой с $\omega = const$.

*) Winslow A.M. Numerical solution of the quasilinear Poisson equation in a nonuniform triangle mesh. - Journ. of Comp. Phys., 1966, v.1, No.2, p.149-172.

**) На рис. 3, а приводится эскиз аксиального сечения магнита на индукцию $B_0 = 3$ Т, использованный в анализе эффективности различных схем.

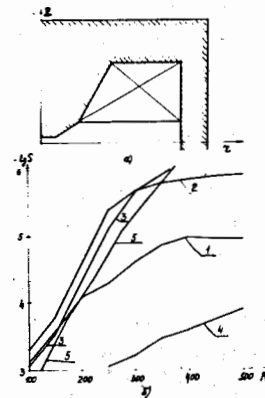


Рис. 3. а) Эскиз электромагнита; $B_0 = 3$ Т. б) "Текущая" точность решения при разных схемах оптимизации: 1 — (I), 2 — (II), 3 — (III), 4 — $\omega(\kappa)$, 5 — МСНП.

Решение магнитоэлектростатических задач релаксационными методами не обходится без экспериментальных приемов и рекомендаций. В этом смысле МСНП отличается большей строгостью; однако для его реализации требуется значительная оперативная память.

С целью улучшения сходимости метода НПВР при решении пространственных задач с использованием потенциала \mathcal{U} применяется "комбинированная схема". Суть её в том, что на участке, где $d\mu/dH^2 < 0$, задается некое H^* и полагается $d\mu/dH^2 \approx 0$ при $H < H^*$. Тем самым устраняется источник расхождений итерационного процесса; при больших H метод НПВР выступает в обычном виде.

Большое внимание уделено различным способам сокращения длительности счета: подготовке массива искомой функции перед началом нелинейных итераций, при-

менению закона Ампера, приему Листерника, требованиям к заданию магнитных характеристик.

Точность решения системы нелинейных уравнений может быть обеспечена достаточно высокой. В конкретных расчетах используются две нормы относительных невязок T и S , определенные по 1) среднеквадратичной невязке и 2) средней величине её модуля. С учетом корреляции этих норм с точностью нахождения характеристик поля различных магнитных систем установлены предельные значения $S \approx T \approx (5 + 0,5) \cdot 10^{-6}$.

Заканчивается глава кратким описанием вычислительных программ численного моделирования, разработанных в НИИЭФА. Они отличаются друг от друга по назначению и возможностям и написаны на разных алгоритмических языках применительно к различным отечественным ЭВМ.

В связи с трудностями реализации методик численного моделирования интерес представляют их частные варианты, разработанные

применительно к определенным типам прецизионных магнитов и осуществленные на ЭВМ со сравнительно низкими характеристиками. В частности, заслуживает внимания прием, состоящий в последовательном сокращении рассматриваемой области и одновременном увеличении числа узлов сетки.

Ряд программ отличается заметной универсальностью. Они снабжены специальным массивом, позволяющим отразить принадлежность ячеек к областям $D_I \div D_{IV}$. Кроме того, могут быть введены дополнительные признаки, если эти области подразделяются на участки с различными свойствами; возможен учет магнитной анизотропии стали.

Для выполнения прецизионных расчетов магнитов со сложной конфигурацией границы железа разработана программа, базирующаяся на нерегулярной треугольной сетке, но в отличие от TRIM в этой программе решение системы уравнений осуществляется методом НИЭР.

Две программы позволяют моделировать пространственные поля.

Моделирование режимов систем полоидального поля токамака выполняется по специальным программам. Они обладают рядом особенностей, допускающих оперативное вмешательство в ход вычислений. Расчеты могут проводиться как с заданной, так и свободной границей плазмы.

Глава IV. СИНТЕЗ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ ФЕРРОМАГНЕТИК

Для ряда идеализированных областей (круговой и эллиптической цилиндры, сфера, эллипсоид вращения, тор) имеется возможность синтезировать токовую конфигурацию при наличии ферромагнетика по заданному полю в D_I . Влияние расположенного за катушками ферромагнетика учитывается с помощью граничного распределения H_T . Поскольку подобные конструкции характеризуются минимумом запасенной энергии и предельно малым расходом токонесящих элементов, они представляют интерес в связи с разработкой сверхпроводящих магнитных систем.

В приближении $\mu_r = \infty$ проблема полностью разрешима аналитическими методами. В общем случае эффективен метод синтеза [II], базирующийся на аналитическом решении для области $D_I \cup D_{III}$ и численном — для D_{II} . В ходе последовательных приближений определяется H_T и устанавливается внешняя граница области D_{III} . Показано, что этот процесс быстро сходится. Общность метода

проявляется в том, что в принципе нет ограничений на конфигурацию и степень насыщения магнитопровода [I2].

К магнитной системе полоидального поля токамака предъявляется ряд специфических требований. На начальной стадии разряда уровень поперечных полей в занятой плазмой области должен быть весьма низким (~ 10 Гс). На всех стадиях разряда необходимо обеспечить условия равновесия плазменного шнура наряду с условиями роста и поддержания тока. Также должны быть приняты во внимание особенности схемы системы питания, ограничения, обусловленные конструкцией установки и т.д. Хотя процессы в токамаке имеют квазистационарный характер, в приближении контурных токов проблема формирования полоидального поля сводится к магнитостатическим задачам синтеза *).

В магнитной системе токамака с глубоким насыщением железного сердечника разделение источников полоидального поля (см. рис. 4) по функциональному признаку представляется искусственным, поскольку конфигурация вихревой обмотки (индуктора), обеспечивающая низкий уровень поля рассеяния в занятой плазмой области, существенно зависит от намагниченности сердечника, определяемой всеми токами и изменяемой в широких пределах в течение разряда.

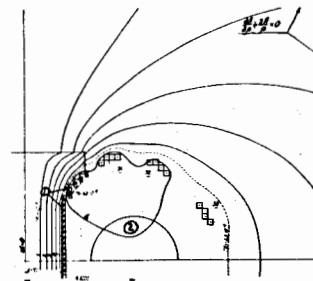


Рис. 4. Геометрия магнитной системы (вариант С):
 $rA = \text{const}$, $t = 0$, $I_z = 0$;
 ① - индуктор, ② - плазма,
 ③1, ③2, ③3 - витки обмотки управления; $i = rA = I$;
 2 - 2,0; ... ; 6 - 6,0 Вб.

Из уравнения баланса напряжений

$$R_i I_i + d\Phi_i / dt = \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, 31, 32, \dots^{**}) \quad (6)$$

*) Захаров Л.Е. Расчет равновесия плазмы в перстеньковом токамаке. - Журн. техн. физ., 1974, т. 44, № 8, с. 1608 - 1613.

**) Индексы соответствуют обозначениям на рис. 4.

для плазменного витка ($\epsilon_2 = 0$) следует

$$\Phi_2(t) = \Phi_2(0) - \int_0^t R_2(t) I_2(t) dt, \quad (7)$$

где первое слагаемое справа - поток, сцепленный с плазмой в начальный момент, второе - текущее изменение потока, требуемое для компенсации активного падения напряжения на обходе шнура.

Условие равновесия плазмы, состоящее в совпадении линии равного потока ($rA = \text{const}$) с контуром плазмы ^{*}, достаточно обеспечить в нескольких граничных точках. При этом распределение продольного компонента плотности тока плазмы задается в виде

$$J_z^{(0)} = \zeta(rA) \cdot r + \eta(rA) \frac{1}{r}, \quad (8)$$

где $\zeta(rA)$ и $\eta(rA)$, а также $R_2(t) I_2(t)$ - некоторые функции, определяемые физической моделью плазмы.

Синтез магнитной системы полоидального поля (нахождение $I_i(t)$) выполняется при одновременном рассмотрении всех его источников с учетом намагничивания железа [13]. При этом используются с небольшими изменениями методики, разработанные для анализа полей стационарных магнитов. Определение с требуемой точностью индуктивных падений напряжений $d\Phi_i/dt$ в каждой цепи предполагает адекватный выбор интервалов между рассматриваемыми моментами времени.

Глава V. ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ И ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

В данной главе обсуждаются результаты математического моделирования конкретных магнитных систем. В большинстве случаев учитываются нелинейные эффекты намагничивания стали в условиях, близких к реальному исполнению.

Перед анализом некоторых магнитных систем ставились сравнительно скромные задачи. Исследования сводились к нахождению распределения поля с целью выяснения магнитных характеристик

^{*} Шафранов В.Д. О равновесных магнитогидродинамических конфигурациях. - Журн. эксперим. и теор. физ., т. 33, № 3 (9), с. 710 - 722.

установки, отработки элементов методики моделирования, обоснования точности расчета. Исходя из этих соображений, выполнялось моделирование магнитных систем фреоновой камеры ИТЭФ, протонного синхротрона ИФВЭ, всех пространственных полей.

С помощью численного моделирования решались также задачи оптимизации геометрических и энергетических параметров магнитных систем при тесной увязке с физическими требованиями и условиями эксплуатации. Так было в случаях пузырьковых камер СКАТ и "Людмила", установки "Гиперон-1" и токамаков.

Определенный интерес представляют вопросы формирования прецизионных полей в синхротронах и системах транспортировки заряженных частиц. Проведены исследования по нахождению оптимальных конфигураций дипольных и квадрупольных электромагнитов. В частности, изучены возможности внутрираемных отверстий и корректирующих токов в них для существенного расширения диапазона индукций с низкой однородностью поля в рабочей области магнитов типа "оконной рамы". Также с учетом анизотропии магнитных свойств железа выполнен анализ поля в электромагните бустера синхротрона ИФВЭ с целью нахождения в отальных листах оптимальной ориентации паза под рабочую область.

Чаще всего процесс оптимизации сводится к рассмотрению последовательности вариантов с применением для каждого из них прямых методов моделирования. Исключение составляют магнитные системы токамака и диполя с разрезным магнитопроводом, параметры которых определяются непосредственно в ходе расчета, т.е. по существу обеспечивается синтез магнитной системы.

Далее перечисляются конкретные магнитные системы, кратко отмечаются их особенности и достигнутый уровень точности моделирования.

I. Магнитные системы пузырьковых камер.

а) При проектировании электромагнита пропан-фреоновой камеры СКАТ были выдвинуты два основных требования: номинальное значение индукции - $B_0 = 2,5 \pm 2,7$ Т, наибольшая неоднородность поля в рабочем объеме - $\epsilon \leq 10\%$. Окончательная [17] величина рабочего объема камеры составила $4,5 \times 1,6 \times 0,95 = 6,84$ м³.

В ходе эскизного и рабочего проектирования рассматривалось несколько вариантов магнита. На основании математического моделирования, а также исследований на модели 1 : 15 был сделан

окончательный выбор конфигурации поперечного сечения электромагнита с учетом конструкции камеры. Затем был выполнен расчет сил, действующих на элементы магнитопровода [16].

Схемы варьирования геометрических параметров магнитопровода изображены на рис. 5 и 6.

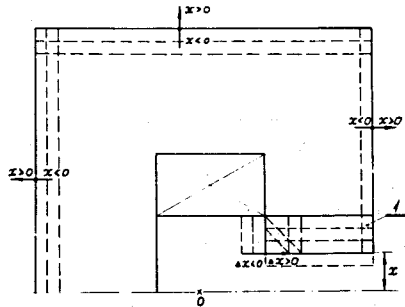


Рис. 5. К оптимизации параметров сечения. Пунктиром показаны рассмотренные варианты. I - корпус охранного объема.

Из сравнения результатов расчета и магнитных измерений следует, что различие в уровне поля составляет ~3% с превышением расчетных данных. Распределения полей практически совпали (7% и 7,5%).

в) С целью отработки методики выполнен расчет поля в магните фреоновой камеры ИТЭФ, обладающей симметрией вращения. Рабочая область камеры - цилиндр ϕ 0,95 м и высотой 0,4 м. Номинальная величина индукции - 1,7 Т.

Расхождение вычисленного и измеренного значений индукции составило 2,4%, что можно объяснить двумерным характером расчетной модели. Относительные распределения практически совпали при точности измерений ~1%.

б) Примерно те же цели ставились перед анализом поля электромагнита водородной камеры "Людмила" [18]. Рабочая область камеры имеет размеры $0,65 \times 0,45 \times 2,00$ м³. Требуемые величины индукции: $B_0 = 2,4 \div 2,5$ Т (в номинальном режиме) и $B_0 = 2,8 + 3,0$ Т (в формированном режиме). Допустимая неоднородность поля $\epsilon < 20\%$.

N	B_0, T	$\epsilon, \%$	Формы сечения
1	2784	9	
2	2783	9,2	
3	2753	9,2	
4	2741	10,1	

Рис. 6

Вычисленные и измеренные значения индукции в центре камеры отличаются на 1,5%. В относительных распределениях наибольшее расхождение менее 0,8% (см.рис. 7).

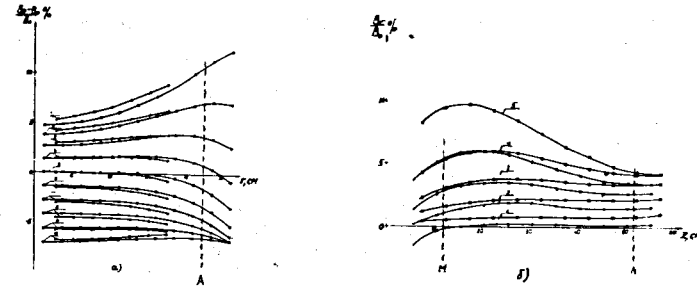


Рис. 7. а) Зависимость $(B_z(r) - B_0) / B_0 \Big|_{z=const}$; z (см): 1 - 10, 2 - 15, ..., 10 - 55; б) Зависимость $B_r(z) / B_0 \Big|_{r=const}$; r (см): 1 - 5,7; 2 - 15,7; ...; 5 - 45,7. А, М, N - границы рабочего объема. □ - расчет; × - эксперимент.

г) В качестве базового магнита для отработки методики численного моделирования нелинейных пространственных полей была выбрана экспериментальная модель электромагнита СКАТ. Вычисленные и измеренные значения индукции практически совпали (2,018 Т и 2 Т). Задание границы рассматриваемой области вблизи электромагнита и отсутствие согласованного краевого условия привели к заметным (до 2,5%) расхождениям в относительных распределениях поля.

2. Электромагнит с разрезным магнитопроводом.

Этот магнит с однородным полем рассчитан на индукцию $B_0 \approx 5,5$ Т в круговой апертуре ϕ 8 см. Расположенный сразу же за обмоткой железный экран состоит из двух частей, разделенных воздушным промежутком. Внутренняя часть охлаждается до гелиевых температур, наружная - находится вне криостата. Конструкция позволяет сократить массу охлаждаемого материала по сравнению с магнитами, экран которых расположен внутри криостата, и уменьшить необходимое число ампервитков по сравнению с магнитами, экран которых находится снаружи криостата.

Внешняя граница обмотки (она же внутренняя граница магнитопровода) определяется в результате расчета. Численное моделирование при различных значениях тока в обмотке показывает, что уменьшение индукции в рабочей области сопровождается ухудшением её распределения. Максимальное значение неоднородности поля удается снизить с 5,6 % до 3,5 % (см. рис. 8), изменяя в разумных пределах положение и размеры щели в магнитопроводе [21].

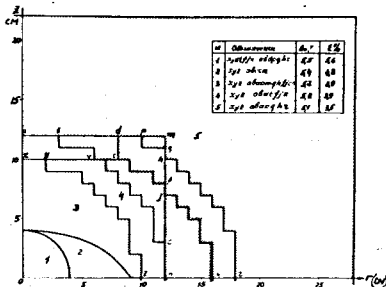


Рис. 8. Сечение магнита:
1 - рабочая область,
2 - обмотка, 3 - "холодное" железо, 4 - щель,
5 - "теплое" железо.

3. Сверхпроводящий магнит "Гиперон-1".

Данная магнитная система на индукцию 6 Т в рабочей области в форме цилиндра ϕ 1 м и высотой 0,4 м была тщательно исследована на стадии проектирования. Это позволило оптимизировать геометрию обмотки и магнитопровода с учетом требований физического эксперимента и условий эксплуатации сверхпроводящего токонесящего элемента. По результатам изучения большого числа вариантов были определены зависимости характеристик поля от различных конструктивных параметров. Так же выполнялся расчет поперечных сил в номинальном и аварийном режимах.

Увеличение индукции в центре рабочей области магнита за счет использования железа составило $\sim 2,2$ Т [19].

Анализ достигнутой точности расчета проводился путем сравнения распределений поля, полученных на сетках, шаг которых по обоим направлениям отличается в два раза (см. рис. 9). Было установлено, что точность нахождения поля в рабочей области магнита является достаточно высокой ($\sim 10^{-4}$). Расчетная и измеренная кривые намагничивания практически совпали [20].

4. Электромагниты синхротронов и систем транспортировки.

К магнитным характеристикам этих устройств обычно предъявляются жесткие требования, что вызывает необходимость в разработке

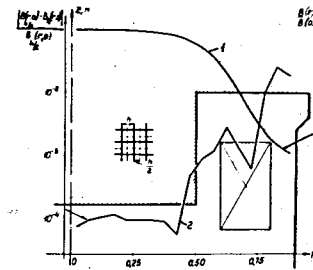


Рис. 9. Распределение индукции (1) и погрешности её расчета (2) в medianной плоскости.

методик, обеспечивавших адекватную точность расчета.

а) В проектировании квадрупольных линз успешно используются результаты исследований, базирующихся на приближении $\mu_{Fe} = \infty$ и потенциале \mathcal{U} . При сопоставлении аналитических и численных решений установлено, что при шаге сетки $h = 0,02a$ (a - радиус апертуры линзы) амплитуды отдельных гармоник определяются с точностью $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ [30].

б) На основании результатов математического моделирования ряда диполей системы медленного вывода синхротрона ИФВЭ получены следующие практические рекомендации:

1) для снижения поля рассеяния септум-магнита на индукции 1 Т следует шунтировать ток в септуме на 1,35 % [24];

2) для выравнивания поля в отклоняющем магните на индукции 1,4 Т следует создать в магнитопроводе специальные корректирующие отверстия [24];

3) для выравнивания поля в отклоняющем магните вплоть до индукции 1,8 + 2,2 Т целесообразно предусмотреть витки с током во внутриаремных отверстиях [28] (см. рис. 10).

Анализ "торцовых полей" отклоняющего магнита, выполненный в предположении $\mu_{Fe} = \infty$ по основанной на использовании \mathcal{U} методике, оказался в хорошем соответствии с экспериментальными данными, полученными при $B_0 = 0,6$ Т [29].

в) Изучение поля электромагнита синхротрона ИФВЭ проводилось с помощью методики, одновременно использующей потенциалы A и \mathcal{U} . Изменение градиента индукции на равновесной орбите при переходе от $B_0 = 0,4$ Т к $B_0 = 1,28$ Т по расчету составило 1,25 %, а согласно эксперименту - 1,35 %. Такое различие можно признать удовлетворительным, если принять во внимание, что эти расчеты выполнялись на ЭВМ "Минск-2". Позднее существенные

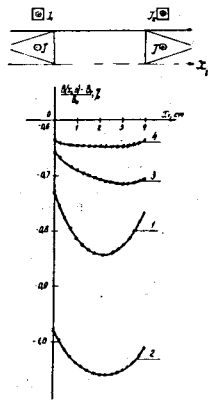


Рис. 10. Поперечное распределение поля ($\alpha_2 = \alpha_3 = 0$). Расчетные данные: $B_0 = 1,85 \text{ Т}$. 1 - без отверстий, 2+4 - с отверстиями: $J_1 = J_2 = 0,12 J_3$ (3), $J_1 = 0,18 J_2$, $J_2 = 0,75 J_3$ (4).

магнитов учет анизотропии необходим при уровне допустимой неоднородности $\epsilon \approx (1 + 2) \cdot 10^{-3}$. Кроме того, неоднородность поля оказывается наименьшей в случае поперечной ориентации ($\chi = 90^\circ$, рис. II) рабочей области по отношению к направлению легкого намагничивания.

5. Система полоидального поля токамака.

С целью выяснения влияния различных участков железного магнитопровода на режимы работы индуктора и обмотки управления в токамаках масштаба установки Т-20 проводилось численное моделирование трех магнитных систем:

*) Fabiani F. Preliminary remarks for a reliable field table at 85 Gev for the Serpukhov accelerator. - 1969. - 5 p. (Preprint/CERN: PS/FES/TN-105);

Лузынович Ю.Т. Расчет магнитных характеристик кольцевого блока ускорителя ИФВЗ методом нерегулярной треугольной сетки. - Л., 1973. - 20 с. (Препринт/ Научно-исслед. ин-т эл. физ. аппар.: Б-0178).

дополнения в анализ поля были внесены работами *), в которых исследовалось распределение поля в форсированном режиме при $B_0 \approx 1,5 \text{ Т}$. В первом случае использовалась программа MARE, во втором - сходная с TRIM программа, отличающаяся, однако, применением метода НПВР.

г) Некоторые марки электротехнической стали обладают явно выраженной магнитной анизотропией, оказывавшей существенное влияние на прецизионные характеристики электромагнитов. Примерно в 10 раз отличаются друг от друга значения магнитной проницаемости по направлениям легкого и трудного намагничивания в стали марки Э330, из которой изготавливаются поворотные блоки бустера протонного синхротрона ИФВЗ. Согласно результатам численного моделирования поля этих

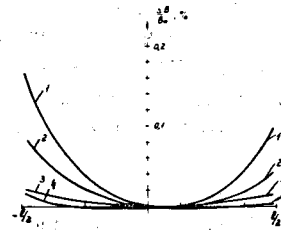


Рис. 11. Относительное распределение поля в медианной плоскости. κ - коэффициент заполнения.
1 - $\kappa = 0,8$, $\chi = 0$, $B_0 = 1,303 \text{ Т}$.
2 - $\kappa = 0,9$, $\chi = 0$, $B_0 = 1,326 \text{ Т}$.
3 - $\kappa = 0,9$, $\chi = \pi/2$, $B_0 = 1,321 \text{ Т}$.
4 - $\kappa = 0,8$, $\chi = \pi/2$, $B_0 = 1,295 \text{ Т}$.

вариантах использовалось двумерное приближение.

Вычислительный алгоритм обеспечивал:

- а) учет активного падения напряжения на обходе плазменного шнура с точностью $\sim 4 \%$;
- б) максимальные смещения силовой линии в заданных точках не меньше чем $0,02 \text{ а}$, а - малый радиус плазменного шнура.

В результате было показано, что при наличии железного сердечника существенно уменьшается ток в индукторе, а благодаря магнитопроводу, кроме того, снижаются токи в обмотке управления. Также был обнаружен эффект притяжения плазмы к стойкам магнитопровода.

С учетом возможных конструктивных решений проведена оптимизация геометрии сердечника. Затем исследована зависимость поля рассеяния от начального намагничивания и рассмотрены требования к системе коррекции.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

I. Применительно к широкому кругу магнитоэлектростатических проблем развит метод математического моделирования, базирующийся на постановке краевых задач и использовании метода

безжелезной (в), с центральным сердечником (с), с замкнутым магнитопроводом (к). При этом одинаковыми задавались расположение токонесущих элементов и модель разряда в плазменном шнуре.

Нелинейными элементами в рассмотренных вариантах в основном являлись плазменный шнур и центральный сердечник. Размеры стоек и балок обратного магнитопровода выбирались таким образом, чтобы индукция в них всегда была ниже индукции насыщения ферромагнетика. Во всех ва-

нелинейной последовательной верхней релаксации (НПВР).

В отличие от обычного применяемого двухступенчатого итерационного метода (с подрелаксацией μ_{Fe}) метод НПВР позволяет:

а) отказаться от дополнительного массива, равного массиву искомой функции, что экономит в два раза необходимый объем оперативной памяти ЭВМ;

б) достигнуть лучшей скорости сходимости.

В результате получен достаточно экономный алгоритм расчета, легко реализуемый за приемлемое время на ЭВМ среднего класса.

2. Разработана и доведена до практического использования схема автоматической коррекции параметра верхней релаксации по текущей информации о сходимости итерационного процесса. Схема обеспечивает существенное сокращение длительности конкретных расчетов.

3. На общий случай пространственных статических полей обобщен метод математического моделирования, основанный на использовании модифицированного скалярного потенциала. С целью обеспечения устойчивой сходимости итерационного процесса в методе НПВР предложено изменение вычислительного алгоритма ("комбинированная схема"). Проведено численное моделирование пространственных полей в модели электромагнита камеры СКАТ, подтвердившее эффективность предложенной схемы.

Разработан и доведен до практического использования метод численного анализа трехмерного поля в мультиполе с кольцевым магнитопроводом, основанный на редукции исходной задачи к двумерной с помощью гармонического представления поля.

4. Разработана методика анализа пространственного поля в произвольной изотропной среде, базирующаяся на использовании трехкомпонентного векторного потенциала и метода НПВР.

5. Метод генерации нерегулярной треугольной сетки распространен на пространственный случай.

6. Получена и обоснована для практических приложений достаточно общая формулировка приближенного граничного условия в виде условия III рода с целью анализа магнитных полей в конечной области.

7. Предложен и доведен до практического использования алгоритм численного моделирования, основанный на непрерывном аналоге метода Ньютона и консервативной схеме сквозного счета. Итерационная процедура, а также выбор параметра, регулирующего

интервалы в последовательности линейных задач, полностью автоматизированы.

8. Для ряда магнитных систем с канонической формой рабочей области предложен метод синтеза конфигурации обмотки с постоянной по сечению плотностью тока, обеспечивающий учет реальной структуры и магнитных свойств внешней по отношению к обмотке среды. С помощью этого метода обоснована магнитная система с разрезным магнитопроводом.

9. Предложен и доведен до практического использования метод синтеза структуры полоидального поля в токамаке, обеспечивающей индуцирование и поддержание тока в плазме и условия МГД-равновесия. Базирующийся на методах моделирования нелинейных магнито-статических полей алгоритм позволяет учесть временные зависимости активного сопротивления, физических и геометрических параметров плазмы, особенности схемы системы питания и требования к форме импульса разряда.

10. Предложен и доведен до практического применения метод численного моделирования двумерных импульсных квазистационарных полей с учетом эффектов насыщения железа. Благодаря согласованию в ходе расчета граничного условия с получающимся распределением плотности тока допустимо размещение внешней границы анализируемой области вблизи проводящей среды.

11. Создан комплекс вычислительных программ, обеспечивающий эффективное проведение моделирования поля большого круга магнитных систем на отечественных ЭВМ различного класса. При написании программ использованы алгоритмические языки: АКИ, АЛГОЛ, ФОРТРАН. В общем случае изотропных и анизотропных сред комплекс позволяет определять зависимости характеристик поля от параметров магнитной системы с различной точностью ($10^{-4} + 10^{-2}$).

12. На стадии проектирования выполнен детальный анализ поля в магнитных системах пузырьковых камер СКАТ и "Людмила" на индукции 2,5 + 3 Т, в результате которого установлено влияние на характеристики поля отдельных конструктивных элементов и проведена оптимизация их параметров. В частности, сокращены внешние габариты магнитопровода без заметного увеличения мощности системы питания, сделаны рекомендации относительно использования железа внутри камеры СКАТ с целью повышения уровня поля на

0,2 Т и улучшения его однородности на 5%. Выполнен детальный расчет поперечных сил, действующих на элементы конструкции при различном возбуждении.

Путем сопоставления данных расчета и магнитных измерений, проведенных на модели электромагнита камеры СКАТ и электромагните пропан-фреоновой камеры ИТЭФ, обладающей симметрией вращения, получено обоснование точности численного моделирования, впоследствии подтвердившееся прямыми магнитными измерениями полей на установках СКАТ и "Людмила".

13. На стадии проектирования проведено детальное исследование поля в сверхпроводящей магнитной системе "Гиперон-1" на индукцию 6 Т, установлено влияние на характеристики поля отдельных конструктивных элементов.

14. Проведено детальное изучение характеристик поля магнитной системы с разрезным магнитопроводом при различном возбуждении. Показана возможность "грубой стабилизации" распределения поля в рабочей области с помощью изменения конфигурации зазора между частями магнитопровода.

15. Разработана и доведена до практического использования методика моделирования поля в квадрупольных линзах; обоснованы выбор шага прямоугольной сетки и точность решения.

16. Разработана и доведена до практического использования методика анализа двумерных прецизионных полей с учетом насыщения железа, основанная на методе последовательных приближений и последовательности прямоугольных сеток с кратными шагами.

Выполнено исследование полей в ряде диполей, применяемых в системе медленного вывода серпуховского синхротрона. Проанализировано влияние на распределение поля в рабочем зазоре специальных отверстий в магнитопроводе и размещенных в них проводников с током. В результате получены параметры электромагнитов с однородным полем типа "оконной рамы", в рабочем зазоре которых практически ($\sim 10^{-4}$) отсутствует зависимость индукции от поперечных координат и эффектов насыщения железа вплоть до индукций $\sim 2,2$ Т.

В приближении $\mu_r = \infty$ методом модифицированного скалярного потенциала проведен анализ поля рассеяния электромагнита типа "оконной рамы".

Выполнен анализ возможных расхождений измеренных и расчетных данных; получено обоснование достигнутой точности расчета.

17. С помощью отмеченной в п. 16 методики проведено моделирование поля в синхротроне ИФВЭ; получено удовлетворительное согласие с экспериментальными данными.

18. Разработана и доведена до практических приложений двумерная методика, базирующаяся на нерегулярной треугольной сетке и методе НПВР. Выполненный с её помощью анализ поля в форсированном режиме синхротрона ИФВЭ находится в хорошем соответствии с аналогичными расчетами, проведенными в ЦЕРНе.

19. Разработана и доведена до практических приложений двумерная методика анализа полей с учетом анизотропии магнитных свойств стали, основанная на методе НПВР. На стадии проектирования выполнен анализ поля бустера синхротрона ИФВЭ. Показано, что учет анизотропии стали Э330 необходим на уровне допустимой неоднородности $(1 + 2) \cdot 10^{-3}$. Проведено изучение вариантов конструкции электромагнита с различной ориентацией воздушного зазора в стальном листе по отношению к направлению проката; сделаны практические рекомендации.

20. Выполнены сравнительные исследования трех магнитных систем установки Т-20: а) безжелезной, б) с железным сердечником, в) с замкнутым железным магнитопроводом. Показано, что с введением сердечника в два раза снижается мощность, требуемая в цепи индуктора; при переходе к варианту с замкнутым магнитопроводом дополнительно снижается мощность, требуемая в цепи обмотки управления.

21. Выполнен детальный анализ поперечного поля в магнитной системе токамака с железным сердечником. Проведена оптимизация параметров сердечника. Для случая Т-20 показана целесообразность небольшого утолщения его торцовых участков. Изучены поля рассеяния сердечника и способы коррекции поля в широком диапазоне начальной намагниченности железа.

Проведенные исследования убедительно показали, что математическое моделирование является эффективным, а часто и единственным способом анализа и оптимизации магнитных систем электрофизических устройств на стадии их проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дойников Н.И., Симаков А.С., Вопросы математического моделирования трехмерных магнитостатических полей. - В кн.: Труды П Всес. сов. по ускор. зар. част. "Наука" М., 1972, т. I, с. 143 - 146.
2. Дойников Н.И., Симаков А.С. Численное моделирование линейных магнитостатических полей. - Ж. выч. мат. и мат. физики, 1971, т. II, № I, с. 137 - 143.
3. Дойников Н.И. и Симаков А.С. Модифицированный скалярный потенциал в краевых задачах магнитостатики. - Ж. техн. физ., 1971, т. 41, № 4, с. 835 - 838.
4. Дойников Н.И. и Симаков А.С. Модифицированный скалярный потенциал и численный анализ пространственных магнитостатических полей на ЭВМ. - В кн.: Труды Всес. семинара "Методы расчета электронно-оптических систем". Изд-во СО АН СССР Новосибирск, 1973, ч. I, с. 20- 32.
5. Дойников Н.И. и Симаков А.С. Применение модифицированного скалярного потенциала к численному решению пространственных задач магнитостатики. - Ж. выч. мат. и мат. физ., 1973, т. 13, № 4, с. 999 - 1009.
6. Дойников Н.И. и Самсонов Г.Н. Определение эффективных длин мультиполей с осесимметричным магнитопроводом. - Ж. техн. физ., 1979, т. 49, № I, с. 198 - 201.
7. Дойников Н.И. и Симаков А.С. Решение двумерных магнитостатических задач на ЭВМ. - Дубна, 1967. - 30 с. (Препринт/ Объед. ин-т ядерн. исслед.: 9 - 3582).
8. Дойников Н.И., Симаков А.С. Методика расчета магнитных полей в электромагнитах с учетом эффектов насыщения железа применительно к ускорительным установкам. - В кн.: Труды Всес. сов. по ускор. зар. частиц. ВИНТИ, М., 1970, т. I, с. 319 - 324.
9. Дойников Н.И. и Симаков А.С. Решение двумерных нелинейных магнитостатических задач на ЭВМ (случай сильного насыщения). - Ж. техн. физ., 1969, т. 39, № 8, с. 1463 - 1471.
10. Жидков Е.П., Дойников Н.И., Симаков А.С. Решение нелинейных краевых задач магнитостатики методом стабилизации по непрерывному параметру. - Дубна, 1975. - 16 с. (Препринт/ Объед. ин-т ядерн. исслед.: РII-8664).

11. Дойников Н.И. К формированию магнитного поля в цилиндрических полостях кругового и эллиптического сечения при больших плотностях тока. - Ж. техн. физ., 1970, т. 40, № 12, с. 2588 - 2591.
12. Сверхпроводящие магниты с железными экранами / Ю.П. Батаков, Н.И. Дойников, А.Г. Жихарева и др. - В кн.: Труды П Всес. сов. по ускор. зар. част., "Наука" М., 1972, т. I, с. 241-243.
13. Бондарчук Э.Н., Дойников Н.И., Мингалев Б.С. Численное моделирование равновесия плазмы в токамаке с учетом эффектов насыщения ферромагнетика. - Ж. техн. физ., 1977, т. 47, № 3, с. 521 - 526.
14. Bondarchuk E.N., Doinikov N.I., Mingalev B.S. Mathematical simulation of equilibrium plasma configurations and power supply operating conditions in Tokamak - type devices. - In: Fusion reactor design concepts. IAEA, Vienna, 1978, p. 455-460.
15. Дойников Н.И. Численный анализ плоскопараллельных квазистационарных электромагнитных полей. - Ж. техн. физ., 1973, т. 43, № 5, с. 897 - 907.
16. К выбору параметров электромагнита пропан-фреоновой пузырьковой камеры СКАТ / В.Д. Борисов, Г.А. Град, Н.И. Дойников и др. - Приб. и техн. exper.; 1972, № 4, с. 249 - 250.
17. Магнит пузырьковой камеры СКАТ. Основные параметры: Изменение магнитного поля / А.И. Богинский, Е.П. Кузнецов, Н.И. Дойников и др. - Приб. и техн. exper., 1979, № 3, с. 54 - 57; Серпухов, 1977. - 16 с. (Препринт / Ин-т физ. выс. эн.: ОНФ77-80).
18. Дойников Н.И., Комарова С.Н., Симаков А.С. Численный анализ поля магнита двухметровой водородной пузырьковой камеры. - Дубна, 1968. - II с. (Препринт / Объед. ин-т ядерн. исслед.: РI3-4134).
19. Сверхпроводящий магнит для формирования пучков частиц с малым временем жизни / И.А. Ветлицкий, А.В. Белоногов, Н.И. Дойников и др. М., 1975. - 35 с. (Препринт / Ин-т теор. и exper. физ.: 93);
20. Сверхпроводящий магнит "Гиперон-I". Особенности конструкции и результаты испытаний / И.А. Ветлицкий, А.В. Белоногов, Н.И. Дойников и др. - М., 1979, - 28 с. (Препринт / Ин-т теор. и exper. физ.: 69).

21. Дойников Н.И. Характеристики поля сверхпроводящего дипольного электромагнита с разрезным магнитопроводом (результаты расчета). - Л., 1977. - 6 с. (Препринт / Научно-иссл. ин-т эл.-физ. аппар.: Б-0342).
22. Дойников Н.И. и Пузынович Ю.Т. Численное моделирование магнитостатических полей с учетом магнитной анизотропии стали. - Ж. техн. физ., 1975, т. 45, № II, с. 2404 - 2406.
23. Дойников Н.И., Пузынович Ю.Т. Численный анализ поля в электромагните бустера протонного синхротрона ИФВЭ с учетом анизотропии. - В кн.: Труды IУ Всес. сов. по ускор. зар. част. "Наука", М., 1975, т. II, с. 138-140.
24. Проект системы медленного вывода протонов из ускорителя ИФВЭ на энергию 70 ГэВ / К.П.Мызников, В.И.Гридасов, Н.И.Дойников и др. - В кн.: Труды УП Межд. конф. по ускор. зар. част. выс. эн. Изд-во АН АрмССР, Ереван, 1970, т. I, с. 480-492.
25. Формирование полоидальных полей в установке "Токамак-20" / Э.Н.Бондарчук, Н.И.Дойников, Б.С.Мингалев и др. - В кн.: Докл. Всес. конф. по инж. пробл. терм. реакт. Л., 1977, т. I, с. 137 - 144.
26. Дойников Н.И., Жидков Е.П., Симаков А.С. К оптимизации вычислительного алгоритма нелинейных краевых задач магнитостатики. - В кн.: Труды Всес. сов. по прогр. и мат. мет. реш. физ. задач. ОИЯИ, ДЮ, II-II264, Дубна, 1978, с. 259-263.
27. Бондарчук Э.Н., Дойников Н.И., Мингалев Б.С. К оптимизации системы полоидального поля токамака. - Электрофиз. аппаратура, 1978, № 16, с. 39 - 46.
28. Авт. свидетельство 30754I (СССР), класс ношн 7/04 от 2I июня 197I. Электромагнит / Н.И.Дойников, А.С.Симаков. -Опубл. в Булл. ОИПОТЗ, 197I, № 20, с. 181.
29. К формированию поля в электромагнитах типа "оконный рама" / В.Д.Борисов; Л.Н.Ваулин; Н.И.Дойников и др. - В кн.: Труды II Всес. сов. по ускор. зар. част. "Наука" М., 1972, т. I, с. 185-187.
30. Дойников Н.И., Самсонов Г.Н. Методика и особенности численного моделирования поля в электромагнитных квадрупольных линиях. - В кн.: Труды Сов. по прогр. и мат. мет. реш. физ. задач. ОИЯИ, ДЮ-7707, Дубна, 1974, с. 24-31.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 июня 1980 года.