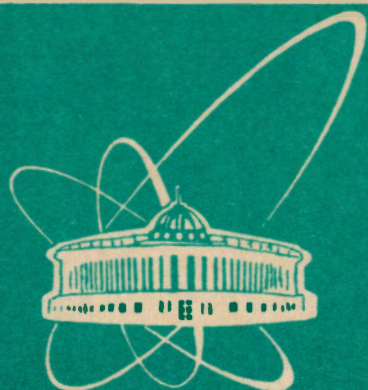


93-256



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P11-93-256

Е.П.Жидков, С.Лима, Р.В.Полякова,
Ф.Фернандес Нодарсе, И.П.Юдин

КОМПЛЕКС ПРОГРАММ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Направлено в «Журнал вычислительной математики»

1993

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.

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 решётки 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.

Под компьютерным исследованием физического явления или системы подразумеваем построение математической модели, описывающей явление или систему, создание численного алгоритма и реализацию его в виде комплекса программ на ЭВМ с включением в него 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 нелинейных уравнений, описывающих явление или систему, так и 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 [1].

Целью настоящей работы является создание комплекса программ КПММС-1.0 численного моделирования магнитных систем с включением в него таких известных программ, как POISSON [2] — численное моделирование двумерных магнитных полей, RELAX3D [3] — решение уравнения Пуассона (Лапласа) в двумерном и трёхмерном случаях, пакета графических программ, таких, как GRAPHER, SURFER, PAW [4]. В комплекс программ включена программа интеллектуальной поддержки (экспертной системы) принятия решения для оптимального выбора, например, конфигурации магнитной системы, программа полиномиального представления компонент магнитного поля с целью дальнейшего использования их в задачах динамики заряженных частиц и программа КОБРАМ — численного моделирования некоторого класса нелинейных обратных задач магнитостатики для математического моделирования безжелезных магнитных систем с прямоугольной апертурой. Достоинством предлагаемого комплекса программ является то, что он сформирован в виде библиотеки программ, которую можно постоянно пополнять или делать замену используемых программ. Авторы не случайно остановили свой выбор на программах POISSON и RELAX3D. Как показывает опыт многолетнего использования системы программ POISSON многими пользователями, эта система из всех известных программ такого класса является наиболее удобной в эксплуатации и обладает высокими вычислительными (временными и точностными) характеристиками. Следует отметить, что в последнюю версию программы POISSON включен алгоритм [5] уточнения поведения магнитного поля на бесконечности, что значительно расширило область применения этой программы.

В таблице Т1 приводятся результаты численных исследований влияния внешней границы (а именно расстояния, на котором она ставится) магнитостатической краевой задачи на численные результаты для реальной магнитной системы СП-49 установки ЭКСЧАРМ (см. рис. 1). Из таблицы видно, что установка внешней границы фактически мало влияет на результаты вычисле-

ний, что позволяет границу ставить близко к области расположения магнитной системы и приводит к возможности "экономить" точки разностной схемы, набрасывая все их на рабочую область магнитной системы (см. рис. 2). С помощью предлагаемого комплекса программ авторами моделировались три магнитные системы: СП-40 установки ЭКСЧАРМ, МС-12 установки ГИПЕРОН и магнитная система установки КРИОН-С. Результаты математических исследований систем СП-40 и КРИОН-С опубликованы [6,7].

Включённая в комплекс программа интеллектуальной поддержки пользователя (экспертная система) обеспечивает автоматизацию работы на основных этапах процесса проектирования магнитной системы и принятия решений, таких, как:

1. подготовка входных данных;
2. накопление и хранение информации, требующейся в процессе моделирования и принятия решения;
3. моделирование разных вариантов магнита;
4. выбор оптимального варианта;
5. проверка решения.

В процессе проектирования модификаций магнита, который представляет совокупность взаимосвязанных различных технических и программных средств, необходим компромисс между такими факторами, как улучшение технических и эксплуатационных характеристик магнитной системы, сокращение её стоимости и одновременно повышение требований к эксплуатационным качествам магнитной системы, необходимым для экспериментов на физической установке.

В комплекс программ составной частью входит накопление банка данных исследуемых конфигураций магнитных систем для дальнейшего графического исследования полученных численных результатов, что значительно облегчает и ускоряет процесс отбора конфигурации магнитной системы для её технической реализации.

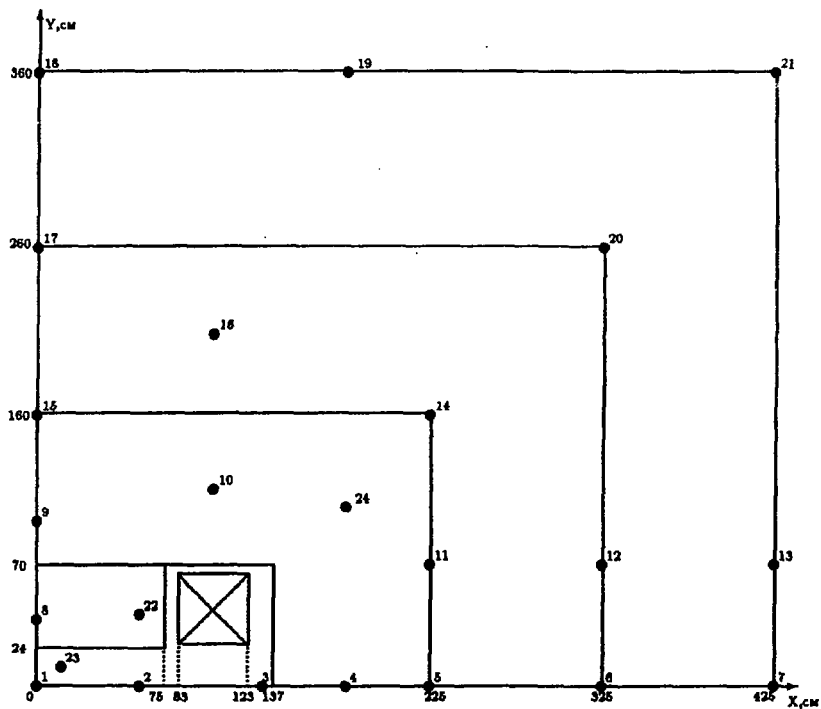


Рис. 1 Конфигурация магнита СП - 40 с указателями точек для Таблицы Т1.

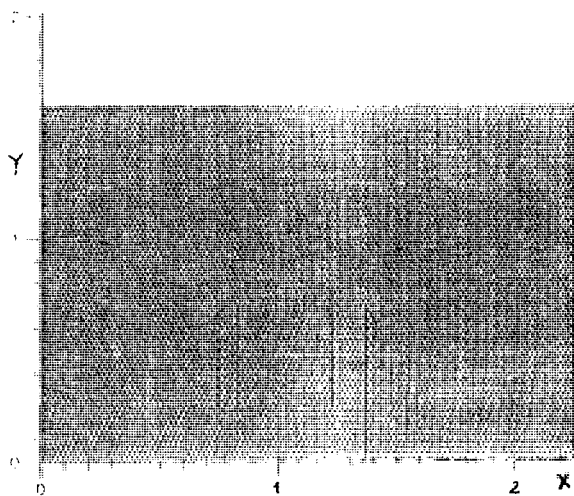


Рис. 2 Расчётная сетка для конфигурации магнита
СП - 40.

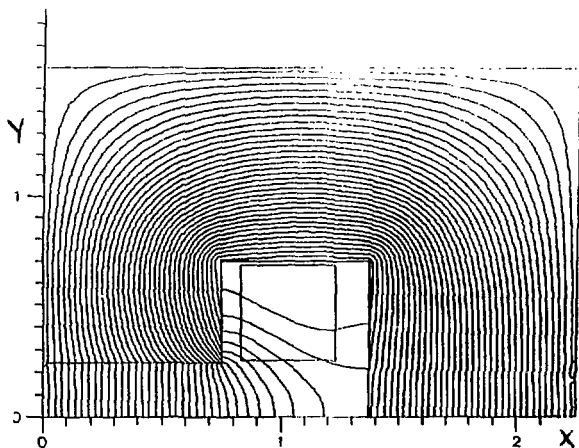


Рис.3. Распределение эквипотенциалей магнитного поля
СП-40.

Таблица Т1: Влияние установки границы

Граница по контуру железа

N_0	Точки	$\mu \neq 1$	$\mu \neq 1$ с граничным потенциалом	$\mu = 1$
1	(0,0)	1.000000E+00	1.006435E+00	9.101970E-02
2	(0.7232143,0)	8.413010E-01	8.413774E-01	8.621703E-02
3	(1.325893,0)	3.212011E-02	3.213000E-02	7.313535E-02
4	(1.808036,0)	1.071432E+00	1.063203E+00	7.816164E-02
5	(2.25,0)	1.070625E+00	1.115976E+00	7.210889E-02
6	(3.25,0)			
7	(4.25,0)			
8	(0,0.4)	1.132919E+00	1.120589E+00	8.454017E-02
9	(0,0.8)	1.119013E+00	1.106081E+00	6.198236E-02
10	(1.004464,1)	1.178384E+00	1.171360E+00	8.971065E-02
11	(2.25,0.8)	8.561879E-01	7.018086E-01	4.945428E-02
12	(3.25,1.4)			
13	(4.25,1.4)			
14	(2.25,1.6)	1.351911E-02	2.222649E-02	2.378625E-04
15	(0,1.6)	0.000000E+00	1.342097E-02	1.008396E-05
16	(1.044643,2)			
17	(0,2.6)			
18	(0,3.6)			
19	(1.808036,3.6)			
20	(3.25,2.6)			
21	(4.25,3.6)			
22	(5.223214E-01,0.4)	1.329308E+00	1.052412E-01	1.328024E+00
23	(1.205357E-01,0.6)	1.215001E+00	7.629009E-02	1.205052E+00
24	(1.888393,1.0)	8.584647E-01	4.507501E-02	8.513203E-01

* μ — магнитная проницаемость железа.

значение потенциала в расчётной области

на расстоянии метр от железа		на расстоянии 2 метра от железа	
$\mu \neq 1$	$\mu = 1$	$\mu \neq 1$	$\mu = 1$
00525E+00	1.086432E-01	1.000761E+00	1.146022E-01
13007E-01	1.024566E-01	8.412983E-01	1.084759E-01
12541E-02	5.759391E-02	3.212667E-02	5.160454E-02
71347E+00	6.009515E-02	1.071387E+00	5.407506E-02
70486E+00	4.643904E-02	5.175781E-01	3.986521E-02
37334E-05	3.563086E-02	4.888326E-05	2.449375E-02
		3.974127E-06	2.064642E-02
32147E+00	1.026768E-01	1.131816E+00	1.086505E-01
2238E+00	8.199421E-02	1.123693E+00	8.811422E-02
8447E+00	8.563380E-02	1.178137E+00	8.300619E-02
59310E-01	3.963881E-02	4.849698E-01	3.536130E-02
52014E-05	2.042312E-02	2.034381E-05	1.770197E-02
		-1.415491E-06	1.509217E-02
35877E-03	2.462005E-02	1.090939E-02	2.410820E-02
2059E-03	3.279036E-02	1.033783E-02	3.993171E-02
6851E-04	2.656450E-02	1.163904E-04	2.345571E-02
2693E-08	3.312201E-06	1.704023E-05	1.246691E-02
		5.528009E-10	5.794839E-07
		2.075975E-06	1.151547E-02
5849E-08	6.213164E-05	1.898937E-06	9.420543E-03
		8.431479E-12	2.440163E-05
3404E+00	1.219614E-01	1.329420E+00	1.279271E-01
5275E+00	9.497976E-02	1.215417E+00	1.009536E-01
6958E-01	4.800537E-02	8.590785E-01	4.217730E-02

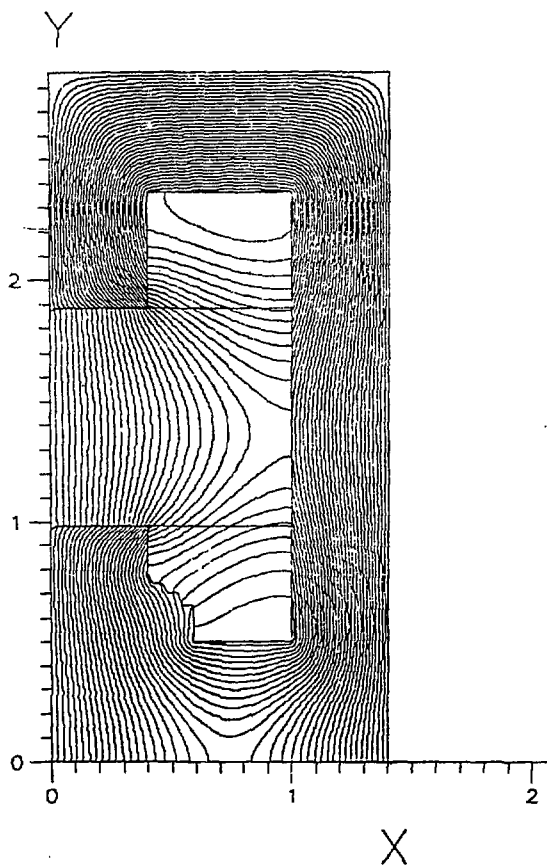
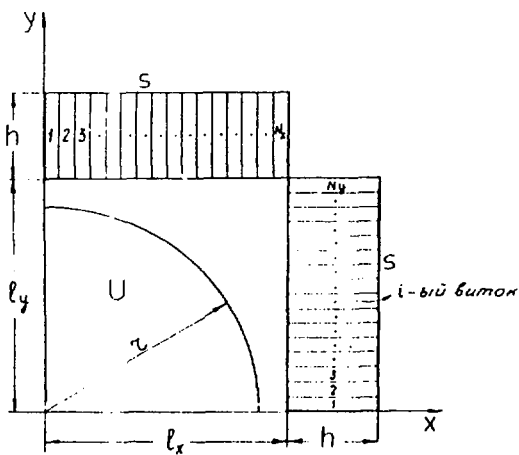
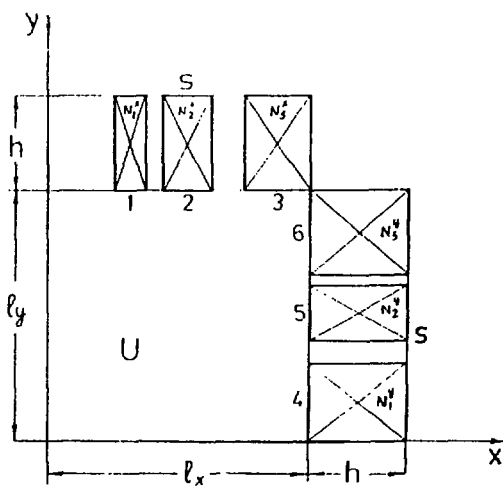


Рис. 4 Распределение эквипотенциалей магнитного поля
МС - 12.



а



б

Рис. 5 а,б Конфигурация безжелезного сверхпроводящего диполя с плоской обмоткой.

Как пример возможностей графических исследований на рис. 3; 4 приводятся вид одной из конфигураций магнитов СП-40 и МС-12 с распределением силовых линий магнитного поля для этих конфигураций.

В предлагаемый комплекс программ для решения трёхмерной краевой задачи Пуассона (Лапласа) включена программа RELAX3D, так как авторам показалось наиболее удобным и простым применить программу ГИУ (граничных интегральных уравнений) [8], разработанную в ОВМ, именно в сочетании с RELAX3D.

Использование расчётного магнитного поля для задач динамики заряженных частиц приводит к проблеме быстрого и надежного (по точности вычислений) вычисления значений магнитного поля в любой точке рассматриваемой области исследований. В связи с этим в комплекс программ включена программа, разработанная авторами, полиномиального представления компонент магнитного поля [9], которая успешно используется для установки ЭКСЧАРМ и получила положительные отзывы пользователей.

Большой интерес в комплексе программ представляет программа КОБРАМ — численного моделирования некоторого класса безжелезных магнитных систем. Возможность конструирования безжелезной магнитной системы с требуемыми характеристиками магнитного поля очень важна, так как отсутствие железа в системе выгодно экономически. В работах [10,11] описан класс СП (сверхпроводящих) безжелезных диполей, численное моделирование которых проводилось с помощью этого комплекса программ. В работе [12] подробно описан численный алгоритм решения некорректной обратной задачи магнитостатики, возникшей в результате математического моделирования СП-диполя типа оконной рамы (см. рис. 5а,б). На этом рисунке приведена одна из возможных реальных конфигураций такого магнита, однородность поля которого составляет $\frac{\Delta B}{B_0} = 10^{-4}$, B_0 — поле в центре зазора.

Основные выводы:

1. Созданный комплекс программ позволяет решать широкий класс задач магнитостатики, накапливать банк данных численных исследований системы, что позволяет значительно

облегчить и ускорить процесс создания и реконструкции магнитных установок.

2. В результате численных экспериментов создан значительный банк данных, включающий информацию для широкого набора расчётных конфигураций магнитов СП-40, МС-12 и сверхпроводящей магнитной фокусирующей системы установки КРИОН-С с соответствующими им картами поля, что позволяет расширить "физическую" интуицию для дальнейшего развития магнитов этого типа, с другой стороны, предложить возможность использования накопленных данных в качестве экспериментальных "заготовок" в численных расчётах установок, использующих магниты типа СП-40 (установка ЭКСЧАРМ), МС-12 (установка ГИПЕРОН) и СП магнитной фокусирующей системы (КРИОН-С).
3. С помощью предлагаемого комплекса программ решен целый ряд важных практических задач, результаты которых были использованы при реконструкции и создании магнитных систем для установок ЭКСЧАРМ и КРИОН-С.
4. Предлагаемый комплекс программ будет развиваться и расширяться, пополняясь новыми программами исследования магнитных систем и динамики заряженных частиц.

Литература

1. С. Лима, Р.В. Полякова, Ф. Фернандес Нодарсе, И.П. Юдин. Экспертная система для исследования магнитных систем. Препринт ОИЯИ P11-92-509, Дубна, 1992, 16с.
2. POISSON Group Programs. User's Guide. CERN Library, Geneva, 1989.
3. RELAX3D. User's Guide and Reference Manual, TRIUMF 4004 Wesbrook Mall, Vancouver, B.C. Canada V6T 2A3, 1992.
4. R. Brun e.a. PAW, CERN Program Library Entry Q121, Geneva, 1989.

5. S. Caspi, M. Helm, L. J. Laslett. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.NS-32, No.5, October 1985.
6. 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, 14с.
7. Е.П. Жидков, С.В. Карташов, В.П. Овсянников, Р.В. Полякова, Б.Н. Хоромский. Численное моделирование сверхпроводящей магнитной фокусирующей системы. P11-88-225, ОИЯИ, Дубна, 1988.
8. Е.П. Жидков, Г.Е. Мазуркевич, Б.Н. Хоромский. Сообщения ОИЯИ P11-86-230; P11-86-333, Дубна, 1986.
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 ЭКС-ЧАРМ. Сообщение ОИЯИ 311-92-436, Дубна, 1992, 14с.
10. Р.В.Полякова. Математическое моделирование однородного магнитного поля безжелезного сверхпроводящего диполя с плоской обмоткой. 11-12228, ОИЯИ, Дубна, 1979.
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.
12. Е.П. Жидков, И. В. Куц, Р.В. Полякова, И.А. Шелаев, И. П. Юдин. Решение одной нелинейной обратной задачи магнитостатики методом регуляризации. P11-88-335, Дубна, ОИЯИ, 1988.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 июля 1993 года.