

# Компьютерное моделирование спектрометрического магнита для экспериментальной установки МАРУСЯ

**Е.П. Жидков**, Р.В. Полякова

*Лаборатория информационных технологий, ОИЯИ*

**И.Г. Волошина, Е.Е. Перепелкин, Н.С. Российская, Т.В. Шаврина,**

**И.П. Юдин**

*Лаборатория физики частиц, ОИЯИ*

## Abstract

This work also presents some results of a numerical analysis of the magnetic systems of the JINR's physical installation MARUSYA with the purpose of studying an opportunity of designing magnetic systems with predetermined characteristics of the magnetic field.

## 1. Введение

Магнитные системы типа представленной на рис. 1 присутствуют в природе на самых различных уровнях: это магниты экспериментальных физических установок, электромоторы и т.д. В настоящее время один из основных методов, используемых при проектировании и создании магнитных систем, является математическое моделирование [1].

Под компьютерным моделированием магнитной системы подразумеваем построение математической модели, описывающей ее, создание численного алгоритма и реализация последнего в виде комплекса программ на ЭВМ с включением в него системы графических программ для цветной и обычной одноцветной визуализации полученных численных 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 [2]. Компьютерное моделирование дает возможность резко уменьшить время анализа поля в магните выбранной конфигурации, повысить точность, сократить стоимость и такого анализа, и самого магнита, т.е. математическое моделирование магнитной системы фактически является инструментом, позволяющим численным путем сделать выбор оптимальной магнитной системы в каждом конкретном случае.

В работе представлены описание программного обеспечения компьютерного моделирования задачи магнитостатики и результаты сравнения расчетного распределения магнитного поля с проведенными измерениями поля модифицированного магнита СП-40 физической установки МАРУСЯ.

## 2. Программное обеспечение для решения задачи магнитостатики

В работе [3] приводится подробное описание большого количества численных методов и соответственно программных продуктов для всех этапов решения магнитостатических задач, а именно входного блока (препроцессор: описание входных данных), блока построения расчетной сетки, блока построения дискретизованных уравнений, блока решения системы алгебраических уравнений (процессор), блока обработки результатов и их визуализация (постпроцессор).

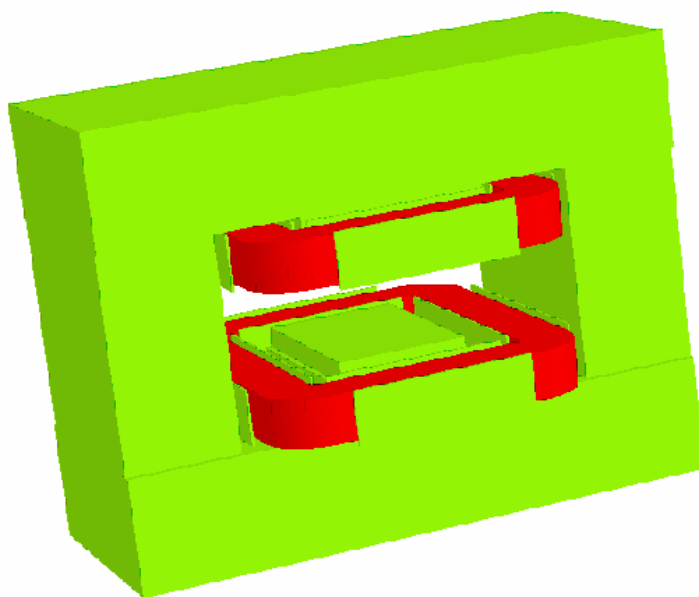


Рис. 1: Общий вид спектрометрического магнита СП-40

Отдавая должное специализированным пакетам программ для решения магнито-статических задач определенного типа, следует отметить вполне оправданное стремление разработчиков магнитных систем иметь инструмент математического моделирования магнитных систем простой в своем использовании и достаточно надежный в смысле полученных численных результатов, как в двумерном, так и в трехмерном случаях.

I. Для решения магнито-статических задач в двумерном случае был создан комплекс программ КПММС [4] численного моделирования магнитных систем, в основу которого положен комплекс программ POISSON [5].

В комплекс программ КПММС входят также:

1. Программа интеллектуальной поддержки (экспертной системы) принятия решения для оптимального выбора, например, конфигурации магнитной системы [2].
2. Программа полиномиального представления компонент магнитного поля [6] с целью дальнейшего использования их в задачах динамики заряженных частиц.
3. Программа КОБРА-М – численного моделирования некоторого класса нелинейных обратных задач магнито-статики для математического моделирования безжелезных магнитных систем с прямоугольной апертурой [7].

II. Для решения магнито-статических задач в трехмерном случае был создан комплекс программ [8] численного моделирования магнитных систем для двух скалярных потенциалов. В этот комплекс программ включен алгоритм уточнения численных расчетов для задач, содержащих так называемые “угловые точки”.

При расчете конкретных магнитных систем по тем или иным причинам приходилось выполнять дополнительные исследования точности полученного решения и

в связи с этим использовать дополнительные численные методы для уточнения решения магнитостатической задачи, а именно:

1) Исследование влияния установки внешней границы  $\Gamma$  краевой задачи на точность выполнения граничного условия  $u(\infty) = 0$ . Численным путем установлено, что установка внешней границы не сильно влияет на точность численных расчетов, что позволяет ставить границу  $\Gamma$  близко к области расположения магнитной системы и дает возможность “экономить” точки разностной схемы, набрасывая их все на рабочую область магнитной системы.

2) Следует также отметить, что в процессе численного моделирования некоторых магнитных систем [9] проводился дополнительный контроль точности аппроксимации условия  $u(\infty) = 0$  по Ричардсону методики, использующей экстраполяцию по параметру  $R^{-1}$ , где

$$R = \max(L_x, L_y) \quad (1)$$

а  $L_x$  и  $L_y$  - длины сторон прямоугольника, ограничивающего расчетную область  $\Omega$ . Используя численный алгоритм по Ричардсону часть конфигураций исследуемых магнитных систем просчитывались для двух радиусов  $R_1$  и  $R_2$ , соответствующих двум различным расчетным областям. Тогда линейная комбинация

$$\bar{u}(Q) = \gamma_1 u_{R_1}(Q) + \gamma_2 u_{R_2}(Q) \quad (2)$$

удовлетворяет оценке  $|u(Q) - \bar{u}(Q)| \leq o(R^{-\beta})$ , т.е. приближает условие  $u(\infty) = 0$  с большей точностью, чем каждое из  $u_{R_1}$  и  $u_{R_2}$ .

3) Очень часто при расчете конкретной магнитной системы область, в которой решается краевая задача, имеет всюду гладкую границу, за исключением конечного числа угловых точек, в окрестности которых граница образована пересечением двух гладких кривых. В таких случаях решение задачи или производные решения могут иметь особенность. В работе [8] изучается вопрос поведения магнитного поля в окрестностях “угловых точек” при помощи алгоритмов, которые дают наилучшую точность решения задач магнитостатики с прямоугольной апертурой.

При численном расчете такой метод дает результаты по точности сравнимые с результатами, получаемыми на сетках в 4-5 раз большим числом узлов вдоль каждой оси, чем изначальная сетка.

### 3. Результаты численного моделирования магнитной системы установки МАРУСЯ ЛВЭ ОИЯИ

В работе [10] представлены результаты математического моделирования и сравнения расчетного распределения магнитного поля с проведенными измерениями поля модифицированного магнита СП-40 установки МАРУСЯ ЛВЭ. В данной работе в качестве примера приводится часть результатов численного моделирования выше названной магнитной системы.

Так на рис. 2 приведен график сравнения эксперимента (сплошные линии) с расчетом (пунктирные линии) основной компоненты  $B_y$  при четырех токах 300 А, 600 А, 800 А, 1100 А в зависимости от поперечной координаты  $x$  при продольной координате  $z$  равной 0. На рис. 3 приводим зависимости  $B_y(x, 0, z)$ ,  $B_y(x, 0.05\text{м}, z)$ ,  $B_x(x, 0.05\text{м}, z)$ ,  $B_z(x, 0.05\text{м}, z)$  для тока 600 А. На рис. 3а приведено распределение основной компоненты поля  $B_y(x, 0, z)$  на медианной плоскости ( $y = 0$ ). Область однородного поля на уровне 1.21 Тл находится целиком под полюсом магнита, спадая на краях полюса (и в поперечном направлении, и по пучку) до величин порядка 8 гаусс для  $z = 2.50\text{м}$

( $x = y = 0$ ) и до 0 Гс в поперечном направлении для  $x = 1.35\text{м}$  ( $y = z = 0$ ). На рис. 3б приведено распределение основной компоненты поля  $B_y(x, 0.05\text{м}, z)$  на плоскости  $y = 0.05\text{м}$ . Область однородного поля на уровне 1.21 Тл находится также под полюсом магнита. Далее поле спадает также на краях полюса (и в поперечном направлении, и по пучку) до величин порядка 5 Гаусс для  $z = 2.50\text{м}$  ( $x = y = 0$ ) и до 0 в поперечном направлении для  $x = 1.35\text{м}$  ( $y = z = 0$ ). На рис. 3в приведено распределение поперечной компоненты поля  $B_x(x, 0.05\text{м}, z)$  на плоскости  $y = 0.05\text{ м}$ . На рис. 3г приведено распределение продольной компоненты поля  $B_z(x, 0.05\text{м}, z)$  на плоскости  $y = 0.05\text{м}$ . Как показано, на рис. 3, предлагаемая методика численного моделирования рассматриваемой магнитной системы адекватно описывает нелинейные измерения формы магнитного поля в зависимости от тока в обмотке.

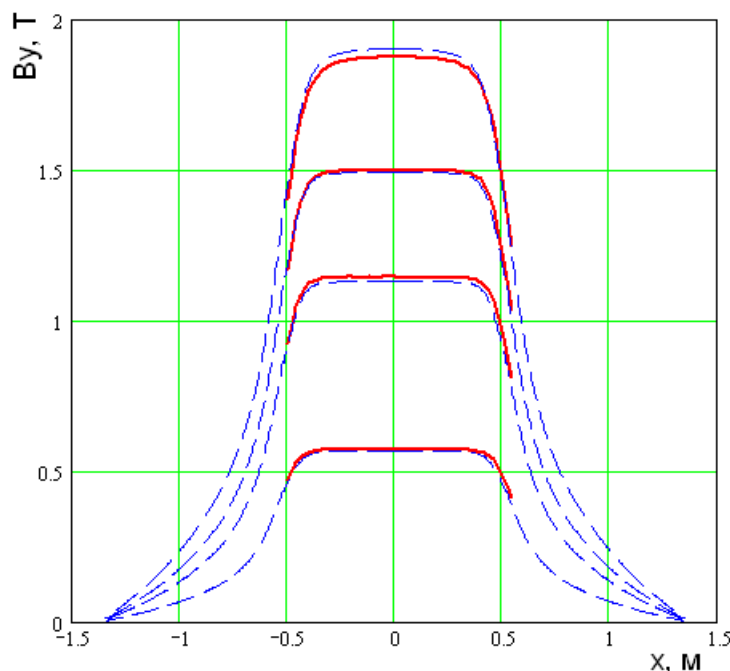


Рис. 2: Расчетная  $B_y$  компонента магнитного поля для  $I=1100\text{ А}$ ,  $800\text{ А}$ ,  $600\text{ А}$ ,  $300\text{ А}$  (при фиксированных  $y = z = 0\text{ м}$ ). Сплошные линии – данные измерений

Полученные численные результаты используются для проведения компьютерного моделирования установки МАРУСЯ и эксперимента на этой установке, а также, после проведения сеансов набора физических данных, используются для обработки этих данных.

#### 4. Заключение

1. Создан комплекс программ КПММС, позволяющий решать широкий класс задач магнитостатики в двумерном случае в декартовой и цилиндрической системах координат, а также позволяет накапливать банк данных численных моделей магнитных систем, что позволяет значительно облегчить и ускорить процесс создания и реконструкции магнитных установок. Разработан комплекс программ расчета 3D-распределения поля магнитных систем.

2. Многочисленные расчеты магнитных систем и сравнение численных расчетов с экспериментальными данными показали, что расчетное распределение магнитного поля в большинстве случаев с точностью 1% (или менее) совпадает с эксперимен-

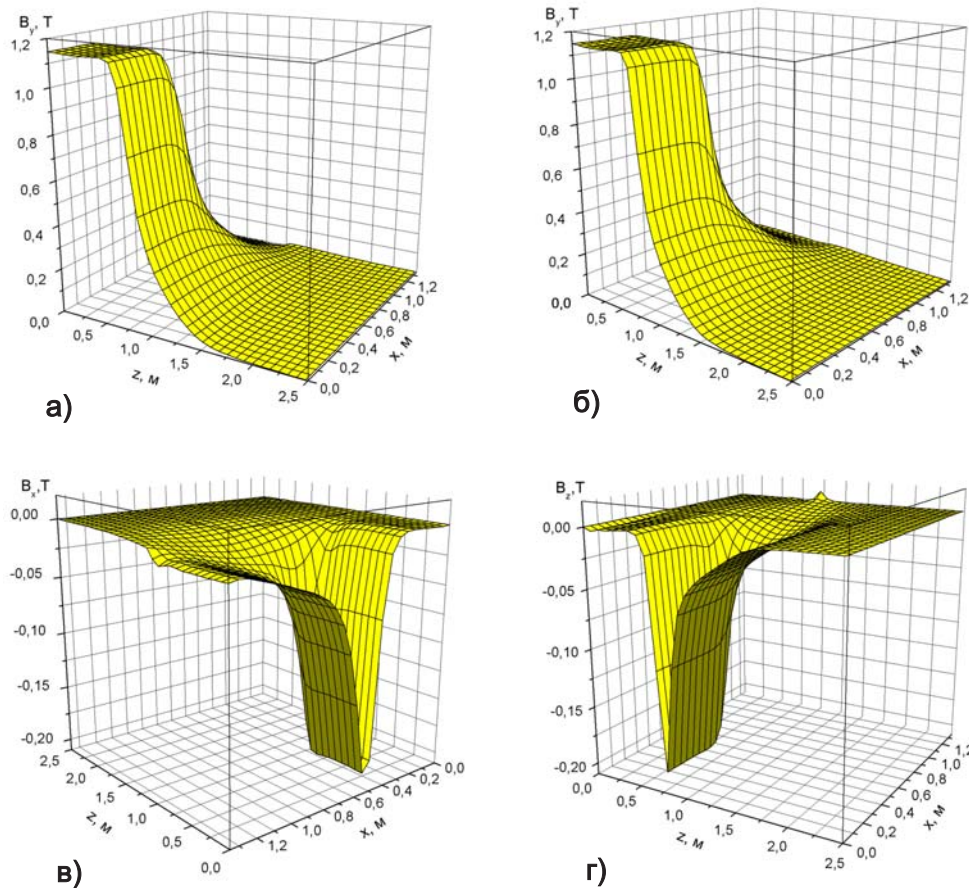


Рис. 3: Пространственное распределение  $B_y, B_x, B_z$  магнитного поля СП-40 для  $I=600$  А

тальными данными. Это оказывается достаточным для проведения численного изучения влияния различных параметров конструкции магнитной системы на величину и форму магнитного поля.

3. На базе метода Ричардсона разработан и использован численный алгоритм дополнительного контроля точности аппроксимации условия  $u(\infty) = 0$ , что, как показывают сравнения с экспериментальными данными, позволяет делать численное моделирование магнитных систем с большей точностью.

4. В так называемых “угловых точках” решение задачи магнитостатики или производные решения могут иметь особенность. Разработан численный метод и алгоритм, который дает наилучшую точность решения задач магнитостатики с прямоугольной апертурой. При численном расчете такой метод дает результаты по точности сравнимые с результатами, получаемыми на сетках в 4-5 раз большим числом узлов вдоль каждой оси, чем изначальная сетка.

5. Таким образом, описанная в работе методика расчета конфигурации магнитного поля установки МАРУСЯ может быть использована для моделирования магнитооптических систем и спектрометров [10, 11].

## Список литературы

- [1] А.А. Самарский, А.П. Михайлов. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. Москва, Наука, Физматлит, 1997.
- [2] С. Лима, Р.В. Полякова, Ф.Фернандес Нодарсе, И.П. Юдин. Экспертная система для исследования магнитных систем. Препринт ОИЯИ Р11-92-509, Дубна, 1992, 16с.
- [3] Айрян Э.А., Жидков Е.П., Федоров А.В., Хоромский Б.Н., Шелаев И.А., Юдин И.П., Юлдашев О.И. Численные алгоритмы расчета магнитных систем ускорителей заряженных частиц, ЭЧАЯ, 1990, том 21, вып.1, с. 251-307.
- [4] Жидков Е.П., С. Лима, Полякова Р.В., Фернандес Нодарсе Ф., Юдин И.П. Комплекс программ для моделирования магнитных систем, Р11-93-256, Дубна, 1993.
- [5] POISSON Group Programs. User's Guide. CERN Library, Geneva, 1989.
- [6] Юдин И.П. Полиномиальное представление компонент измеренного магнитного поля спектрометра ЭКСЧАРМ, Сообщения ОИЯИ, Р11-92-436, Дубна, 1992.
- [7] Полякова Р.В., Жидков Е.П., Юдин И.П. Регуляризация по А.Н. Тихонову в одной задаче магнитостатики В трудах 13 конференции "Математика, компьютер, образования", Дубна, 2006 г. в печати.
- [8] Yudin I.P., Perepelkin E.E. 3D-Field Calculations of Magnets by the Two Scalar Potential Method // Report N P-084 on ICAP-2004, S-Petersburg, 2004.
- [9] Жидков Е.П. и др. Препринт ОВМ АН СССР, N187, М., 1988.
- [10] Балдин А.А., Юдин И.П. и др. Численное моделирование распределения поля магнита СП-40 установки МАРУСЯ и сравнение результатов с экспериментальными данными. Препринт ОИЯИ Р11-2006-99. Дубна, 2006г.
- [11] Р.В. Полякова, Е.Е. Перепелкин, Т.В. Шаврина, И.П. Юдин Расчет распределения поля спектрометрического магнита // Письма в ЭЧАЯ, (2006), т.3, вып.7, сс.74-77. (Труды конференции, посвященной памяти проф. В.П.Саранцева, Алушта, 8-10 сент. 2005).