

УДК 51-7: 621.3.013+621.384.8

РАСЧЕТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО МАГНИТА

Р. В. Полякова, Е. Е. Перепелкин, Т. В. Шаврина, И. П. Юдин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Проектирование и конструирование магнитных систем электрофизических установок требуют предварительного математического моделирования. Математическое моделирование необходимо и в процессе наладки, и в ходе последующей эксплуатации установки. Хотя расчеты полей магнитных систем проведены нами на основе решения ряда прямых задач магнитостатики, мы их относим к классу обратных задач магнитостатики, так как осуществляем фактически поиск оптимальной конструкции токовых элементов и железного ярма для заданного распределения магнитного поля. В настоящей статье предлагается метод численного решения задачи магнитостатики для областей с границами, содержащими «угловые точки». С использованием вышеназванного метода удалось численно моделировать магнитные системы прямоугольной конфигурации с большей точностью. В данной статье, в частности, приводятся численные расчеты нескольких модификаций магнитной системы СП-94, используемой в ряде экспериментальных установок.

Design, construction and operation of magnetic systems of some electrophysical setups require a preliminary mathematical modelling. While calculating the fields of the mentioned magnetic systems (on the base of solving a set of the direct problems of magnetostatics), we are concerned with solving the inverse problem of magnetostatics, namely, with finding an optimal construction of the current elements and ferromagnetic yoke for the required distribution of the magnetic field. In the present work a method of refinement of numerical solution to magnetostatic problem for the area with the boundaries containing the «corner points» is proposed. The method stated above was used for the numerical simulation of a set of modifications of the magnetic system SP-94 used in some experimental setups.

1. ГЕОМЕТРИЯ МАГНИТА СП-94

Система координат (правая тройка) выбрана таким образом, что ось Z направлена по пучку. Горизонтальная плоскость — XOZ . На рис. 1 приведена $1/2$ часть сечения сердечника магнита в плоскости YOX (поперечной к пучку), а на рис. 2 дан разрез ($1/8$ часть) в вертикальной плоскости YOZ . Область Ω_f заполнена ферромагнетиком, а область Ω_c — источниками тока.

2. ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ В УГЛОВЫХ ТОЧКАХ

Для решения магнитостатических задач на первом этапе был создан комплекс программ КПММС-1.0 [1] численного моделирования магнитных систем с включением в него таких известных программ, как POISSON [2].

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.

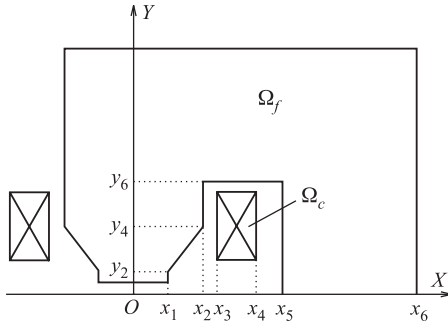


Рис. 1. 1/2 часть сечения сердечника магнита в плоскости XOY

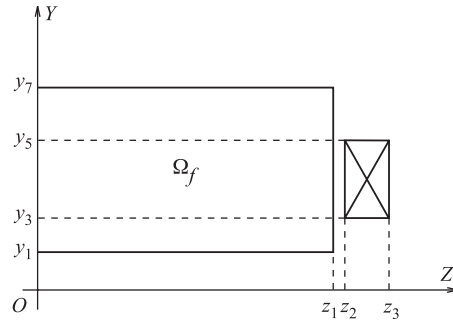


Рис. 2. 1/8 часть магнита в вертикальной плоскости YOZ

В этих случаях решение задачи или производные решения могут иметь особенность. При решении таких задач численными методами необходимо учитывать характер поведения ее решения в окрестности угловой точки.

В настоящей статье изучается поведение магнитного поля в окрестностях угловых точек при помощи алгоритмов [3], которые дают наилучшую точность решения задач магнитостатики с прямоугольной апертурой, описываемых уравнением типа $\operatorname{div} [\mu (|\nabla u|) \nabla u] = 0$.

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

3. МАГНИТ СП-94, ИФВЭ, ПРОТВИНО

Результаты проведенных расчетов показывают, что (см. рис. 3) величина неоднородности магнитного поля (на уровне 1 Тл) в зазоре 13 см наиболее высокая на краю полюса (полюс размером $x \times y = (30 \times 130)$ см), она достигает $\sim 10\%$ для $y = 5,2$ см (т. е. вблизи края полюса).

С другой стороны, такая же величина неоднородности наблюдается и для медианной плоскости ($y = 0$), когда координата $x > 10$ см, а именно на краю полюса, т. е. для $x \sim 15$ см. Для увеличения области (части апертуры) однородного поля естественно установить (определенным способом) ферромагнитные накладки на краю полюса.

Такие накладки (см. рис. 4, таблицу) были установлены из стали, близкой по магнитным характеристикам к стали сердечника, на полюсе спектрометрического магнита СП-94 для эксперимента ЭКСЧАРМ-II на канале 5Н ускорителя У-70 в ИФВЭ, г. Протвино. На рис. 5 для медианной плоскости, $Y = 0$, приведены графики для базового магнита без накладок и двух вариантов магнитов (А и В) с ферромагнитными накладками. Можно констатировать, что мы действительно наблюдаем значительное увеличение размера области однородного поля внутри 13-сантиметрового межполюсного зазора.

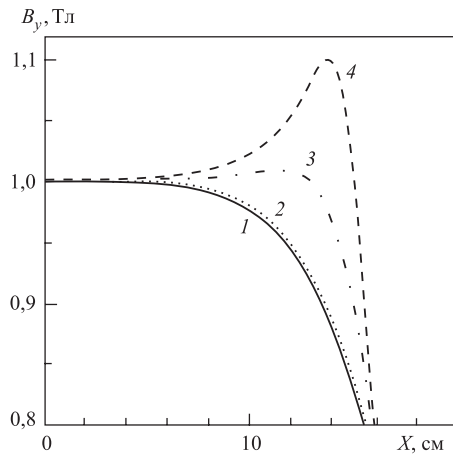


Рис. 3. Распределение индукции поля у края полюса: 1 — $y = 0$; 2 — $y = 1,3$; 3 — $y = 3,9$; 4 — $y = 5,2$ см

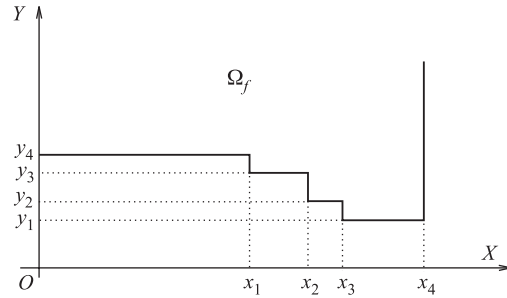


Рис. 4. 1/8 часть магнита в вертикальной плоскости YOx

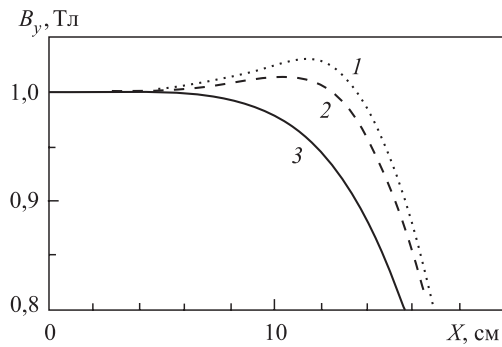


Рис. 5. Распределение магнитного поля $B_y(x)$: 1 — без накладок; 2 — с накладками (вариант А, оптимальный); 3 — с накладками (вариант В)

Размеры накладок на полюсе спектрометрического магнита (в м)

x_1	x_2	x_3	x_4
0,108	0,1235	0,1345	0,15
y_1	y_2	y_3	y_4
0,053	0,05587	0,06162	0,065

4. МАГНИТ СП-94, ЛВЭ ОИЯИ

Результаты численного моделирования распределения магнитного поля для величин зазора $h = 7, 8, 9, 10$ и 13 см в магните (для полного тока в полуобмотке $I = 0,72 \cdot 10^5$ А, создающего поле в 1 Тл в зазоре 13 см) приведены на рис. 6. Построенные зависимости позволяют пересчитывать поле и для других, близких к приведенным, конфигураций. Результаты трехмерного расчета ($h = 9$ см, $s = 30$ см) мы приводим на рис. 7, где показаны зависимости B_y от x при $z = 0$ и различных значениях y : $y = 0$, $y = 0,9$ см, $y = 1,8$ см, $y = 2,7$ см. В настоящее время рабочим вариантом магнита СП-94 в ЛВЭ ОИЯИ

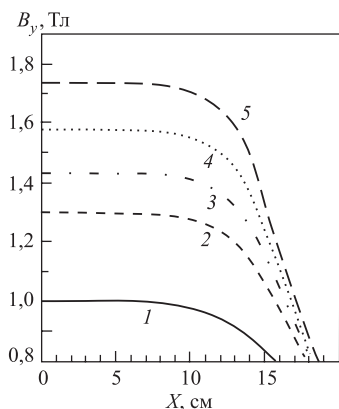


Рис. 6. Распределение магнитного поля $B_y(x)$: 1 — $h = 13$; 2 — $h = 10$; 3 — $h = 9$; 4 — $h = 8$; 5 — $h = 7$ см

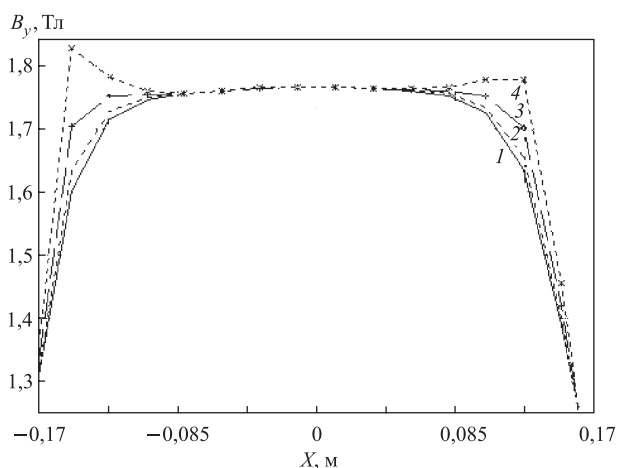


Рис. 7. Зависимость B_y от x для различных значений y : 1 — $y = 0$; 2 — $y = 0,9$; 3 — $y = 1,8$; 4 — $y = 2,7$ см

на эксперименте «Дельта-сигма» является межполюсный зазор $h = 9$ см с шириной полюса $s = 30$ см. Для него номинальным является поле в центре $B_y(0, 0, 0) = 1,75$ Тл.

5. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Методом численного моделирования получены 2-мерные и 3-мерные распределения магнитного поля нескольких модификаций спектрометрического магнита СП-94, широко используемого в ядерно-физических экспериментах.

2. Найдена оптимальная конфигурация магнита, наиболее соответствующая требованиям, для проведения эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhidkov E. P. et al. The Complex of Programs for the Modelling of Magnetic Systems. JINR, P11-93-256. Dubna, 1993.
2. Holsinger R. F., Iselin C. POISCR-r604, User Guide. CERN, SPS/EMA, 1982.
3. Yudin I. P., Perepelkin E. E. 3D-Field Calculations of Magnets by the Two Scalar Potential Method. Report NP-084 on ICAP-2004. St. Petersburg, 2004.