

92/6

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



С345е4
В-751

1/11.75
P9 - 9216

С.Б.Ворожцов

4658/2.75

РАСЧЕТ С-ОБРАЗНОГО МАГНИТА МЕТОДОМ СЕТОК

1975

P9 - 9216

С.Б.Ворожцов

РАСЧЕТ С-ОБРАЗНОГО МАГНИТА МЕТОДОМ СЕТОК

Для приближенного расчета 3-мерной конфигурации магнитного поля C-образного магнита иногда используют методики расчета двумерных магнитных полей /1-2/. Однако методика работы /1/ позволяет сделать лишь грубые оценки ввиду использования метода конформных преобразований. На основании работы /2/ возможен расчет поля лишь вдоль средней линии поперечного наконечника магнита.

В нашем случае была использована та же, что и в работе /2/, система программ *POISSON* для расчета двумерных полей методом сеток /3/. В качестве тестового был взят модельный магнит моноэнергетического циклотрона /4/, для которого известно распределение магнитного поля в зазоре. На рис. I. представлена геометрия I-го октанта магнита и указаны радиальное (A) и азимутальное (B) сечения, использованные для двумерных расчетов по системе *POISSON* в декартовых координатах. В программе учитывалась реальная кривая намагничивания для стали марки "ст-3".

Заштрихованным на рис. I искусственно построенным областям приписывалось постоянное значение магнитной проницаемости $\mu = \text{const}$, выбираемое из условия получения в зазоре магнита известного уровня поля при заданных ампервитках $IW = 11985 \text{ Ав}$. В азимутальном сечении заштрихованная область служит, кроме того,

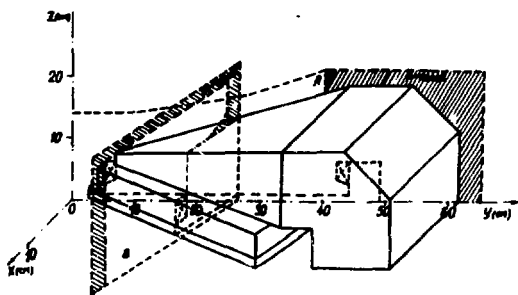


Рис. I. Геометрия магнита М1.

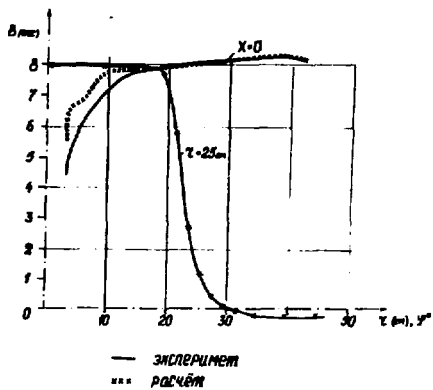


Рис. J. Распределение магнитного поля в зазоре магнита М1.

для замыкания магнитного потока. Для минимального искажения магнитного поля в зазоре за счет заштрихованных областей необходимо было максимально удалять их от зазора. При этом найдено численными экспериментами, что размер этих областей и их положение (при условии удаленности от зазора и подбора надлежащего уровня поля) не влияют на распределение магнитного поля в зазоре. На рис. 2 приведены результаты расчетов по *POISSON* в сравнении с измеренными кривыми. Совпадение азимутальных распределений находится в пределах 1% величин. Для радиального распределения поля в области $15 \text{ см} < r < 42 \text{ см}$ точность расчетов также составляет $\approx 1\%$. Однако для радиусов $3 \text{ см} < r < 15 \text{ см}$ расхождение кривых составляет $\approx 10\%$, что объясняется уменьшением азимутального размера полюса и ярма магнита в этом диапазоне радиусов. Улучшения точности расчета радиального сечения можно, по-видимому, добиться, разбивая магнит на области с переменным коэффициентом заполнения так, как это сделано в работе^{/2/}. К недостаткам метода следует отнести необходимость определения до начала расчета с точностью $\approx 20\%$ требуемых ампервитков обмотки возбуждения по заданной конфигурации магнита и требуемому уровню поля в зазоре. Численными экспериментами найдено, что по крайней мере для магнита М1 изменение ампервитков в пределах $\approx 20\%$ (при надлежащей настройке магнитной проницаемости заштрихованных областей на фиксированный уровень поля в зазоре) не меняет относительного распределения поля зазора.

Сеточная методика была применена также и для расчета магнита со спиральным полюсным наконечником^{/5/}. Детали геометрии полюсного наконечника этого магнита приведены на рис. 3. Средняя линия полюса состоит из двух сопряженных на радиусе C_H дуг окружностей с радиусами кривизны ρ_H и ρ_K . Уравнение средней линии можно записать в виде:

$$Y_c(\gamma) = Y_H - \theta_0 + \alpha \gamma \cos \left(\frac{\gamma^2 + C_H^2}{2\gamma C_0} \right), \quad (1)$$

где

$$C_0 = \sqrt{C_H^2 + \left(\frac{\gamma_T^2 - C_H^2}{2\gamma_T \cos \alpha_T} \right)^2}, \quad (2)$$

$$\gamma_T = \begin{cases} R_H & \text{при } \gamma < C_H, \\ R_H & \text{при } \gamma \geq C_H, \end{cases} \quad (3)$$

$$\alpha_T = \begin{cases} \alpha_H & \text{при } \gamma < C_H, \\ \alpha_H & \text{при } \gamma \geq C_H, \end{cases} \quad (4)$$

$$\theta_0 = \alpha \gamma \cos \frac{C_H}{C_0}. \quad (5)$$

Смысл остальных обозначений ясен из рис. 3. Уравнения боковых границ полюса можно записать в виде:

$$Y_{1,2}(\gamma) = Y_c(\gamma) \mp \frac{1}{2}(A\gamma^2 + B\gamma + D). \quad (6)$$

Оставляя схему расчета для магнита со спиральным полюсом ту же, что и для магнита МІ, необходимо было учесть кривизну боковых границ полюса. Для этого азимутальные сечения рассчитывались в цилиндрической системе координат таким образом, что локально поле vicino каждой точки боковых границ полюса аппроксимировалось полем кольцевой нитки типа изображенной на рис. 3 для границы $Y_2(\gamma)$. Радиус и координаты центра кольцевой нитки находились из уравнений боковых границ полюса. Уравнения боковых границ в параметрическом виде можно представить так :

$$X_{1,2} = \gamma \cdot \cos [Y_{1,2}(\gamma)], \quad (7)$$

$$Y_{1,2} = \gamma \cdot \sin [Y_{1,2}(\gamma)].$$

Радиус кривизны определяется по формуле

$$RK_{1,2} = \frac{(x'_{1,2}{}^2 + y'_{1,2}{}^2)^{3/2}}{x'_{1,2} y''_{1,2} - x''_{1,2} y'_{1,2}} = \frac{\Delta_{R_{1,2}}^{3/2}}{\Delta_{K_{1,2}}}, \quad (8)$$

координаты центра кривизны - по выражениям

$$x_{C,1,2} = x_{1,2} - \frac{y'_{1,2} \cdot \Delta_{R_{1,2}}}{\Delta_{K_{1,2}}}, \quad (9)$$

$$y_{C,1,2} = y_{1,2} + \frac{x'_{1,2} \cdot \Delta_{R_{1,2}}}{\Delta_{K_{1,2}}},$$

где

$$x'_{1,2} = \cos \varphi_{1,2} - r \sin \varphi_{1,2} \cdot \varphi'_{1,2}, \quad (10)$$

$$y'_{1,2} = \sin \varphi_{1,2} + r \cos \varphi_{1,2} \cdot \varphi'_{1,2},$$

$$x''_{1,2} = -2 \sin \varphi_{1,2} \cdot \varphi'_{1,2} - r (\cos \varphi_{1,2} \cdot \varphi'^2_{1,2} + \sin \varphi_{1,2} \cdot \varphi''_{1,2}), \quad (11)$$

$$y''_{1,2} = 2 \cos \varphi_{1,2} \cdot \varphi'_{1,2} + r (-\sin \varphi_{1,2} \cdot \varphi'^2_{1,2} + \cos \varphi_{1,2} \cdot \varphi''_{1,2}),$$

$$\varphi'_{1,2} = - \frac{r^2 - C_H^2}{r \sqrt{4C_0^2 r^2 - (r^2 + C_H^2)^2}} \mp \frac{1}{2} (2Ar - B),$$

$$\varphi''_{1,2} = \frac{(r^2 - C_H^2) [8C_0^2 r^2 - (r^2 + C_H^2) (3r^2 + C_H^2)]}{r^2 [4C_0^2 r^2 - (r^2 + C_H^2)^2]^{3/2}} - \quad (12)$$

$$- \frac{2r^2 [4C_0^2 r^2 - (r^2 + C_H^2)^2]}{r^2 [4C_0^2 r^2 - (r^2 + C_H^2)^2]^{3/2}} \mp A.$$

Значения поля в точках окружности радиуса τ основной системы координат определялись по значениям поля кольцевой шиммы в соответственных точках, помеченных стрелками на рис.3 для границы

$\mathcal{Y}_2(\tau)$. Аналогичная процедура расчета применялась для границы $\mathcal{Y}_1(\tau)$. Замыкание потока в азимутальном сечении выполнялось, как при расчете магнита МЦ, путем введения дополнительных областей $\mu = const$. Значение μ этих областей выбиралось исходя из совпадения максимального поля в зазоре азимутального сечения со значением поля на соответствующем радиусе в зазоре радиального сечения. Для радиального сечения область $\mu = const$ не вводилась. При заданных конфигурации магнита и уровне поля в зазоре магнита требуемые амперватки обмотки возбуждения определялись в соответствии с методикой работы /6/.

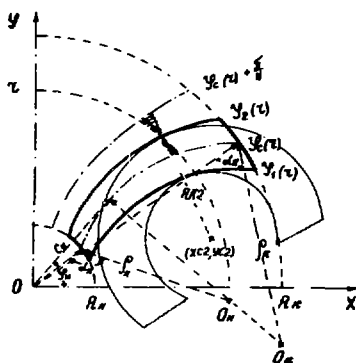


Рис.3. Полюсной наконечник магнита.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Н.Канунников. Краткие сообщения по физике № 3, март 1970, ФИАН, стр. 33.
2. B. Berkes, D. Brombach . Proc. of the Fifth Int. Conf. on Mag. Tech. Frascati, 1975.
3. K. Halbach, R. Holsinger, S. Maguary. Proc. of the Fifth Int. Conf. on Mag. Tech. Frascati, 1975.
4. S. B. Vorozhtsov, B.I. Zamolodchikov, N.L. Zaplatin. Proc. of the Fifth Int. Cycl. Conf. Oxford, 1969, p. 414.
5. В.П.Дзюбелов, В.Н.Дмитриевский, В.В.Кольга.ОИЯИ, Р9-7833, Дубна, 1974.
6. С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин. ОИЯИ, Р9-5669, Дубна, 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 октября 1975 года.