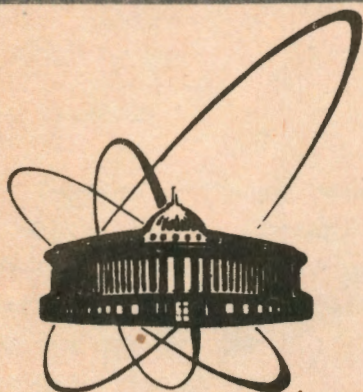


92-129



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P9-92-129

Г.Г. Гульбемян, Й.Франко

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА  
ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНЫХ СТРУКТУР  
ИЗОХРОННЫХ ЦИКЛОТРОНОВ  
С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ПОЛЮСАМИ

Направлено в журнал "Nuclear Instruments and Methods"

1992

## 1. Введение

Решение проблемы проектирования и оптимизации магнитного контура, выбора среднего уровня магнитного поля, формы магнитной структуры и ее фокусирующих свойств для циклотронных магнитов, так называемого компактного типа, описывается на разном уровне сложности и точности в публикациях нескольких авторов [1, 2, 3, 4].

В этой публикации показаны результаты анализа некоторых зависимостей магнитных структур, экспериментально полученных на модельных и на реально действующих циклотронных магнитах компактного типа с цилиндрическими полюсами, которые тоже позволяют просто, но при том достаточно точно оценить и оптимизировать вышеупомянутые характеристики циклотронных магнитов этого типа.

## 2. Зависимость среднего магнитного поля от характеристик питания и геометрии зазора $\langle B \rangle = f(NI/d_{cp})$

Экспериментальные данные этой зависимости были получены в результате анализа магнитных полей

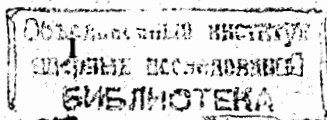
а) модельных У225Р, У200Б

б) реально действующих У400, У400М

циклотронных магнитов.

В случае модельных магнитов среднее магнитное поле было вычислено как среднее арифметическое из токовой зависимости этого поля в долине и между секторами циклотронного магнита.

Для действующего магнита циклотрона У400 среднее магнитное поле было вычислено из физических характеристик реально ускоренных ионов, а для циклотронного магнита У400М из карты измеренного магнитного поля для разных уровней возбуждения магнита.



Таким образом полученные экспериментальные точки можно достаточно точно аппроксимировать полиномом

$$\langle B \rangle = b_0 + b_1 (NI/d_{cp}) + b_2 (NI/d_{cp})^2 + b_3 (NI/d_{cp})^3 + b_4 (NI/d_{cp})^4 + b_5 (NI/d_{cp})^5 + b_6 (NI/d_{cp})^6 + b_7 (NI/d_{cp})^7 + b_8 (NI/d_{cp})^8,$$

[Тл;  $10^5$  А/м]

где (NI)... ампер-витки основной катушки

$$d_{cp} \dots (d_{дол} + d_{сект})/2$$

с коэффициентами:

$$\begin{aligned} b_0 &= 1,5891 \cdot 10^{-2} & b_5 &= -9,7169 \cdot 10^{-7} \\ b_1 &= 1,2607 \cdot 10^{-1} & b_6 &= 1,3240 \cdot 10^{-8} \\ b_2 &= 4,0324 \cdot 10^{-3} & b_7 &= -9,4476 \cdot 10^{-11} \\ b_3 &= -7,9752 \cdot 10^{-4} & b_8 &= 2,7608 \cdot 10^{-13} \\ b_4 &= 3,9207 \cdot 10^{-5} \end{aligned}$$

при среднем квадратическом отклонении равном  $3,93 \cdot 10^{-2}$  [рис. 1].

Простой заменой переменных можно также аппроксимировать зависимость  $NI/d_{cp} = f(\langle B \rangle)$  полиномом

$$NI/d_{cp} = d_0 + d_1 \langle B \rangle + d_2 \langle B \rangle^2 + d_3 \langle B \rangle^3 + d_4 \langle B \rangle^4 + d_5 \langle B \rangle^5 + d_6 \langle B \rangle^6 + d_7 \langle B \rangle^7 + d_8 \langle B \rangle^8$$

[ $\cdot 10^5$  А/м; Тл]

с коэффициентами:

$$\begin{aligned} d_0 &= -3,7387 \cdot 10^{-2} & d_5 &= 7,6759 \cdot 10^3 \\ d_1 &= 1,7161 \cdot 10^2 & d_6 &= -4,1501 \cdot 10^3 \\ d_2 &= -1,4132 \cdot 10^3 & d_7 &= 1,1857 \cdot 10^3 \\ d_3 &= 4,7141 \cdot 10^3 & d_8 &= -1,3881 \cdot 10^2 \\ d_4 &= -8,0377 \cdot 10^3 \end{aligned}$$

при среднем квадратическом отклонении, равном 1,35, и таким образом определить зависимость среднего зазора магнита от уровня среднего магнитного поля

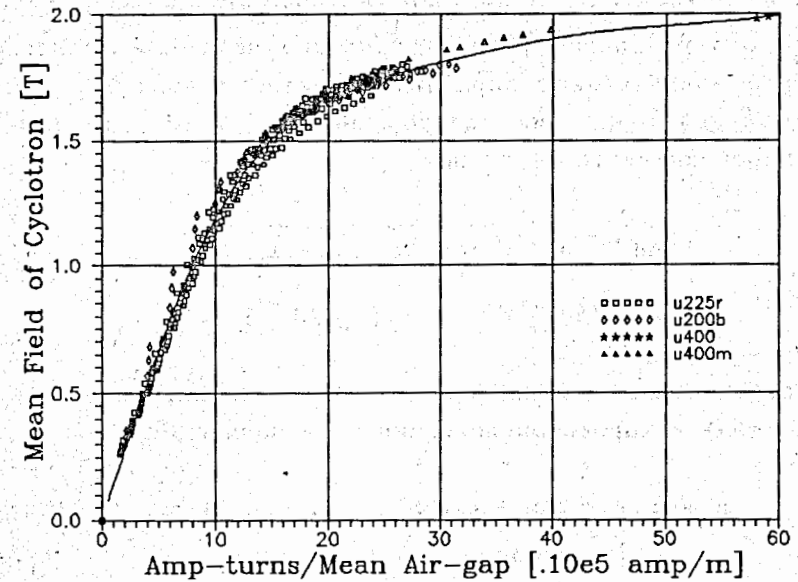


Рис. 1. Аппроксимированная зависимость среднего магнитного поля от характеристик питания и геометрии зазора.

$$d_{cp} = \frac{NI}{d_0 + d_1 \langle B \rangle + \dots + d_8 \langle B \rangle^8}, \quad [m; 10^5 \text{ А, Тл}]$$

которую можно использовать для первоначального формирования радиального роста магнитного поля толщиной сектора.

3. Зависимость амплитуды азимутальной вариации поля от уровня среднего магнитного поля и соотношения зазоров в долине и между секторами  $\Delta V_{дол}^{сект} = f(\langle B \rangle, d_{дол}/d_{сект})$

Для анализа использовались экспериментальные данные, полученные на модельных магнитах У225Р и У200Б при меняющемся уровне среднего магнитного поля  $\langle B \rangle$  и соотношении их воздушных зазоров в месте измерения [рис. 2], которое для магнитов соответственно менялось в пределах от 1,42 до 2,29 и от 2,80 до 4,84.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что для каждого среднего уровня магнитного поля  $\langle B \rangle$  зависимость амплитуды азимутальной вариации магнитного поля  $\Delta V_{\text{дол}}^{\text{сект}}$  является функцией отношения зазоров  $\Delta V_{\text{дол}}^{\text{сект}} = f(d_{\text{дол}}/d_{\text{сект}})$  и хорошо аппроксимируется функцией

$$\Delta V_{\text{дол}}^{\text{сект}} = K \sqrt{(d_{\text{дол}}/d_{\text{сект}}) - 1}, \quad \text{или}$$

$$(\Delta V_{\text{дол}}^{\text{сект}})^2 = a [(d_{\text{дол}}/d_{\text{сект}}) - 1].$$

Экспериментальные данные показывают, что параметр  $a = f(\langle B \rangle)$  и хорошо аппроксимируется полиномом

$$a = c_0 + c_1 \langle B \rangle + c_2 \langle B \rangle^2 + \dots + c_5 \langle B \rangle^5 \quad [\text{Тл}; \text{Тл}]$$

[рис. 3]

с коэффициентами:

$$\begin{aligned} c_0 &= -2,4547 \cdot 10^{-4} & c_3 &= 2,2666 \\ c_1 &= 1,9852 \cdot 10^{-1} & c_4 &= -1,6582 \\ c_2 &= -7,4543 \cdot 10^{-1} & c_5 &= 3,5515 \cdot 10^{-1} \end{aligned}$$

при среднем квадратическом отклонении равном  $5,06 \cdot 10^{-3}$ .

В результате зависимость, которая аппроксимирует экспериментальные точки, можно описать следующим уравнением

$$\Delta V_{\text{дол}}^{\text{сект}} = \sqrt{a (d_{\text{дол}}/d_{\text{сект}}) - 1}, \quad [\text{Тл}; \text{Тл}]$$

[рис. 4]

Вторым способом аналитического описания экспериментальных данных амплитуды азимутальной вариации магнитного поля  $\Delta V_{\text{дол}}^{\text{сект}}$  является описание двумерным полиномом третьей степени

$$\begin{aligned} \Delta V_{\text{дол}}^{\text{сект}} = & g_0 + g_1 \langle B \rangle + g_2 (d_{\text{дол}}/d_{\text{сект}}) + g_3 \langle B \rangle^2 + \\ & + g_4 \langle B \rangle (d_{\text{дол}}/d_{\text{сект}}) + g_5 (d_{\text{дол}}/d_{\text{сект}})^2 + \\ & + g_6 \langle B \rangle^3 + g_7 \langle B \rangle^2 (d_{\text{дол}}/d_{\text{сект}}) + \\ & + g_8 \langle B \rangle (d_{\text{дол}}/d_{\text{сект}})^2 + g_9 (d_{\text{дол}}/d_{\text{сект}})^3 \end{aligned}$$

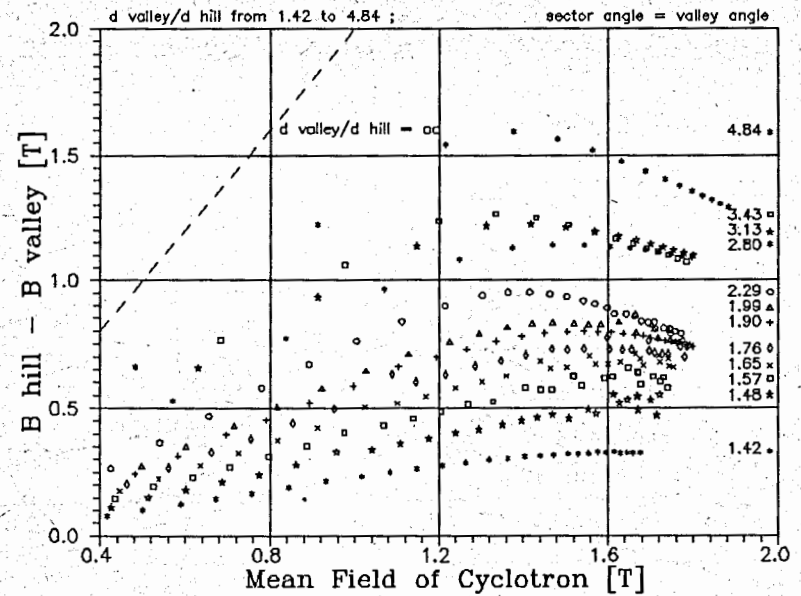


Рис. 2. Экспериментальные зависимости амплитуды азимутальной вариации поля от уровня среднего магнитного поля и соотношения зазоров в долине и между секторами.

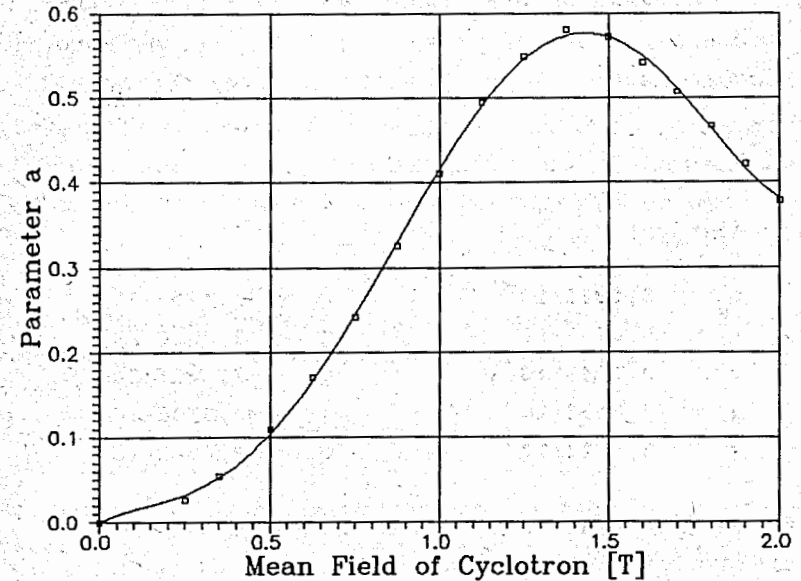


Рис. 3. Зависимость параметра  $a$  от уровня среднего магнитного поля.

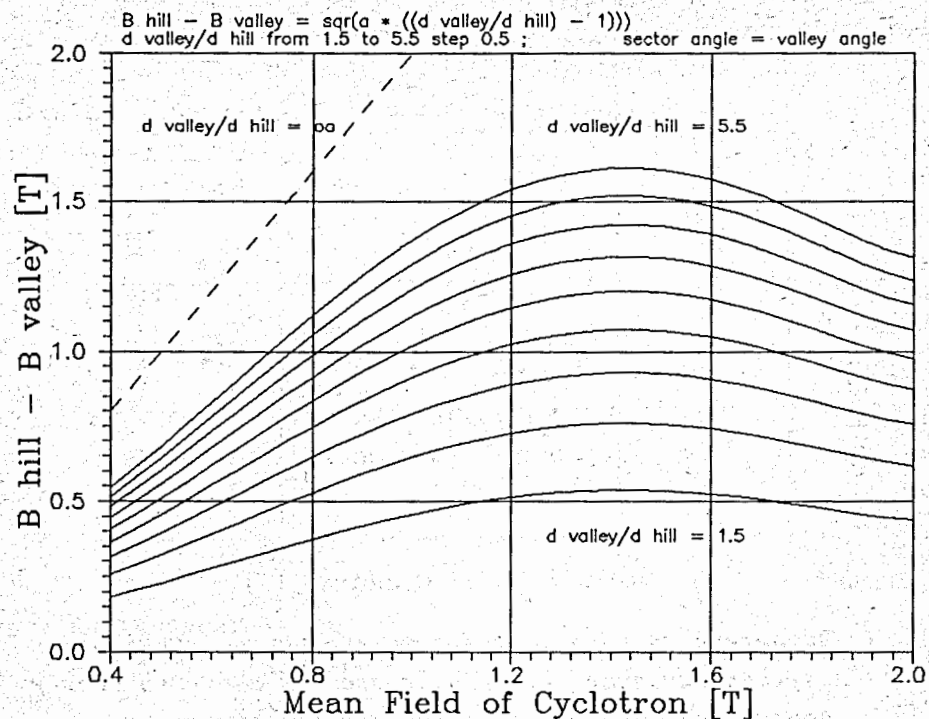


Рис. 4. Аппроксимированная зависимость амплитуды азимутальной вариации поля от уровня среднего магнитного поля и соотношения зазоров в долине и между секторами.

с коэффициентами:

$g_0 = -2,6913 \cdot 10^{-1}$	$g_5 = -1,1253 \cdot 10^{-1}$
$g_1 = -8,0737 \cdot 10^{-1}$	$g_6 = -2,6620 \cdot 10^{-1}$
$g_2 = 3,6648 \cdot 10^{-1}$	$g_7 = -1,3616 \cdot 10^{-1}$
$g_3 = 7,9492 \cdot 10^{-1}$	$g_8 = -2,2105 \cdot 10^{-2}$
$g_4 = 5,6815 \cdot 10^{-1}$	$g_9 = 9,4078 \cdot 10^{-3}$

при среднем квадратическом отклонении равном  $4,85 \cdot 10^{-2}$ .  
 Результаты этой аппроксимации приведены на [рис. 5].

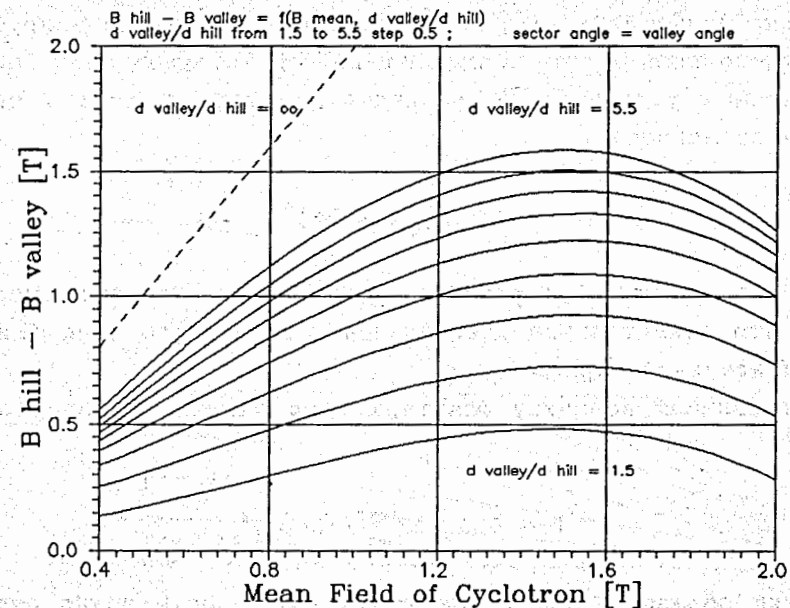


Рис. 5. Аппроксимированная зависимость амплитуды азимутальной вариации поля от уровня среднего магнитного поля и соотношения зазоров в долине и между секторами (двухмерным полиномом).

4. Зависимость функции вариации магнитного поля (флаттера)  $F$  от величины среднего магнитного поля и соотношения геометрических зазоров в долине и между секторами

$$F = f(\langle B \rangle, \frac{d_{\text{пол}}}{d_{\text{сект}}})$$

Величина флаттера  $F$  имеет принципиальное значение для определения частоты аксиальных бетатронных колебаний

$$\nu_z^2 = -k + \frac{N^2}{N^2 - 1} F (1 + 2 \text{tg}^2 \xi)$$

и устойчивости движения ускоряющих частиц и также влияет на величину частоты радиальных бетатронных колебаний

$$\nu_r^2 = 1 + k + \frac{3N^2}{(N^2 - 1)(N^2 - 4)} F (1 + \text{tg}^2 \xi)$$

Если допустить, что азимутальная форма анализируемого магнитного поля в первом приближении достаточно точно описывается прямоугольной, то величина флаттера  $F$  хорошо описывается зависимостью

$$F = (\Delta V_{\text{дол}}^{\text{сект}} / 2\langle B \rangle)^2.$$

Анализ флаттера  $F$  реально существующих магнитов показывает, что азимутальное распределение магнитного поля ближе к трапецеидальной форме.

Это снижает величину флаттера  $F$  на величину около 10%, и тогда

$$F = 0,9 (\Delta V_{\text{дол}}^{\text{сект}} / 2\langle B \rangle)^2$$

Таким образом, полученные точки зависимости можно аппроксимировать двумерным полиномом третьей степени.

$$F = h_0 + h_1 \langle B \rangle + h_2 (d_{\text{дол}} / d_{\text{сект}}) + h_3 \langle B \rangle^2 + h_4 \langle B \rangle (d_{\text{дол}} / d_{\text{сект}}) + h_5 (d_{\text{дол}} / d_{\text{сект}})^2 + h_6 \langle B \rangle^3 + h_7 \langle B \rangle^2 (d_{\text{дол}} / d_{\text{сект}}) + h_8 \langle B \rangle (d_{\text{дол}} / d_{\text{сект}})^2 + h_9 (d_{\text{дол}} / d_{\text{сект}})^3$$

с коэффициентами:

$h_0 = -9,1335 \cdot 10^{-2}$	$h_5 = 1,8852 \cdot 10^{-3}$
$h_1 = -1,6807 \cdot 10^{-2}$	$h_6 = 4,6096 \cdot 10^{-3}$
$h_2 = 8,5595 \cdot 10^{-2}$	$h_7 = -3,4667 \cdot 10^{-2}$
$h_3 = 1,9013 \cdot 10^{-2}$	$h_8 = -3,5811 \cdot 10^{-4}$
$h_4 = 3,2850 \cdot 10^{-2}$	$h_9 = -1,4242 \cdot 10^{-4}$

при среднем квадратическом отклонении, равном  $9,57 \cdot 10^{-3}$  [рис. 6].

Следует отметить, что для центральных областей циклотронов, где азимутальная протяженность сектора сравнима с величиной  $d_{\text{сект}}$ , величина флаттера  $F$  уменьшается в 2-3 раза от вышеприведенных величин.

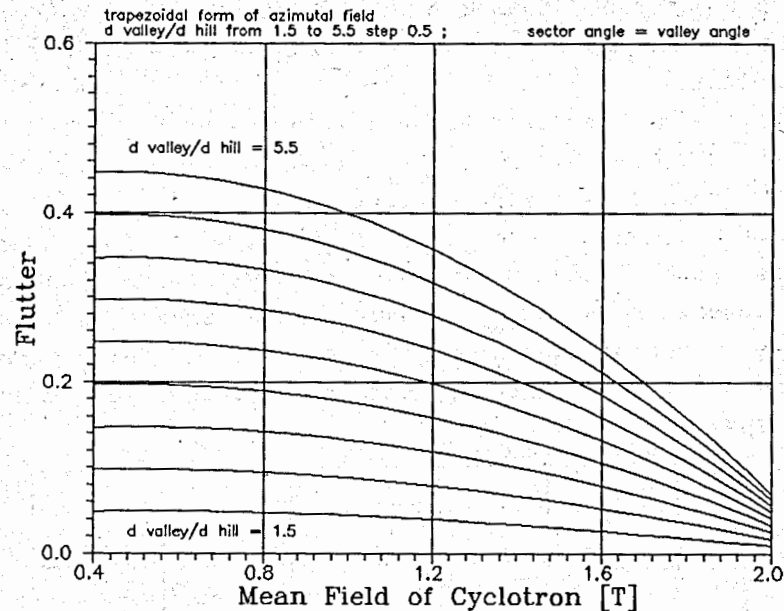


Рис. 6. Аппроксимированная зависимость флаттера  $F$  от уровня среднего магнитного поля и соотношения зазоров в долине и между секторами.

5. Зависимость подъема радиального распределения среднего магнитного поля  $\Delta V_{\text{РВМВ}}$  от поля в центре магнита

$$\Delta V_{\text{РВМВ}} = f (V_{\text{центр}})$$

Подъем радиального распределения среднего магнитного поля  $\Delta V_{\text{РВМВ}}$  определяется уравнением

$$\Delta V_{\text{РВМВ}} = \langle B \rangle - V_{\text{центр}}$$

как разность величин среднего магнитного поля  $\langle B \rangle$  на радиусе вывода магнита ( $0,86 - 0,89 R_{\text{полус}}$ ) и поля в центре магнита  $V_{\text{центр}}$ .

Для модельных циклотронных магнитов У200Б, У225Р, Е2 и для действующего магнита У400М эти величины были получены из оптимальной изохронной кривой радиального распределения магнит-

ного поля, которые были с использованием программы "Magnit" [8] аппроксимированы экспериментально полученные точки этой зависимости.

В случае действующего магнита У400 величины подъема радиального распределения поля  $\Delta B_{R_{\text{выв}}}$  были вычислены прямо из физических характеристик ускоряющих ионов.

Анализ зависимости  $\Delta B_{R_{\text{выв}}} = f(B_{\text{центр}})$  и ее графическое изображение [рис. 7] показывают, что величина подъема радиального распределения поля  $\Delta B_{R_{\text{выв}}}$  с возбуждением магнита, и соответственно, с ростом поля в центре магнита падает и аппроксимировать ее можно линейной падающей функцией с градиентом  $k = -0,2674$ .

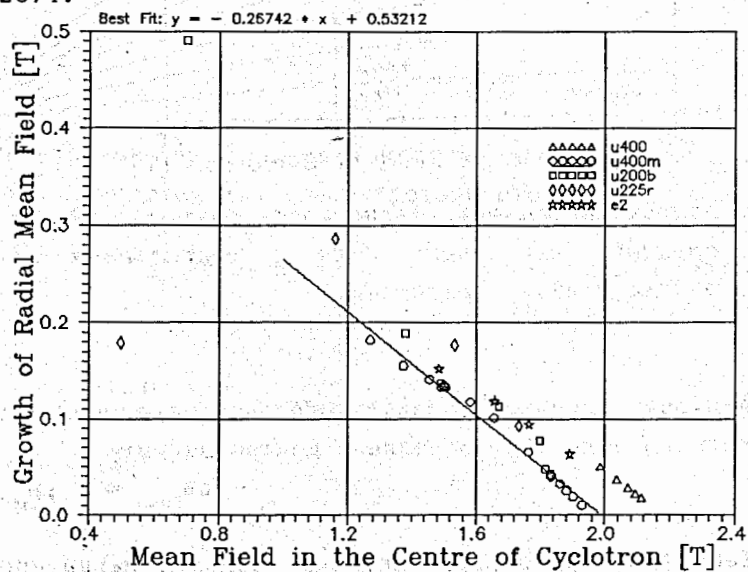


Рис. 7. Экспериментальные зависимости подъема радиального распределения среднего магнитного поля.

6. Радиальная зависимость вариации среднего магнитного поля от вариации поля в центре магнита

$$\text{var}\langle B \rangle_R = f(\text{var}B_{\text{центр}})$$

Известно, что при увеличении возбуждения в основной катушке магнита циклотрона от нуля до некоторой величины

радиальное распределение среднего магнитного поля сохраняется.

Ситуация изменяется при более высоких величинах возбуждения в основной обмотке, при которых узлы или части магнитных узлов, близких к медианной плоскости испытывают насыщение. Можно оценить, что это происходит при  $B_{\text{сект}} > 1,7-1,8$  Тл. При этом вариация магнитного поля при изменении возбуждения магнита больше в центральной области циклотрона компактного типа, чем на больших радиусах

$$\text{var} B_{\text{центр}} > \text{var}\langle B \rangle_R$$

[рис. 8]

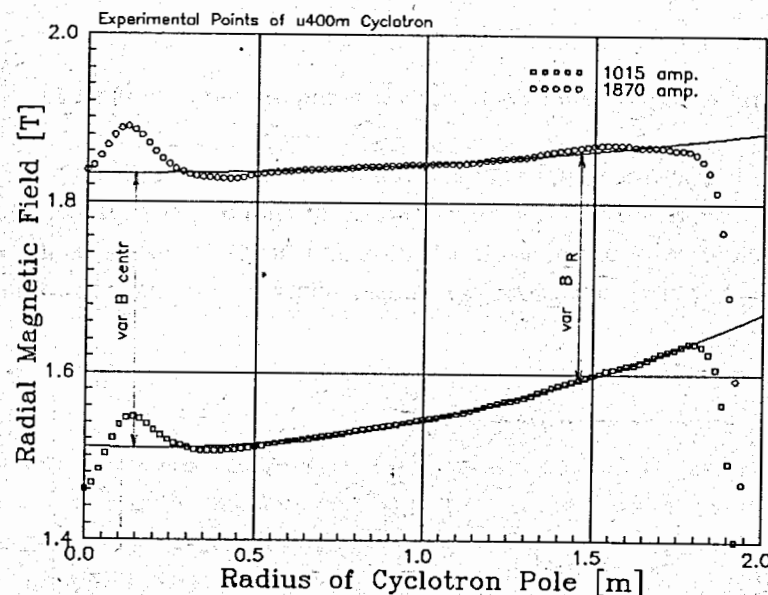


Рис. 8. Радиальная зависимость вариации среднего магнитного поля от вариации поля в центре магнита.

Для всех нами исследованных магнитов можно с помощью зависимости, показанной на рис. 7, доказать, что

$$\text{var}\langle B \rangle_{R_{\text{выв}}} = (k + 1) \text{var}B_{\text{центр}}$$

где  $R_{\text{выб}} = 0,86 - 0,89 R_{\text{полюса}}$   
 $k = -0,2674$

Следует отметить при этом, что для каждого  $R$

$$\text{var}\langle B \rangle_R \approx \left[ 1 + k \left( \frac{R}{R_{\text{выб}}} \right)^2 \right] \text{var} B_{\text{центр}}$$

что позволяет формировать изохронное магнитное поле только за счет вариации тока питания основной обмотки. При этом резко уменьшается мощность корректирующих катушек.

Эта особенность используется на циклотронах тяжелых ионов ЛЯР ОИЯИ У200, У400, У400М.

### 7. Основные характеристики проанализированных магнитов

У всех проанализированных нами циклотронных магнитов компактного типа сечение внешнего магнитного контура спроектировано так, чтобы уровень магнитного поля в нем не превышал величины 1,7 Тл, и отношение расстояния  $L$  от центра основной

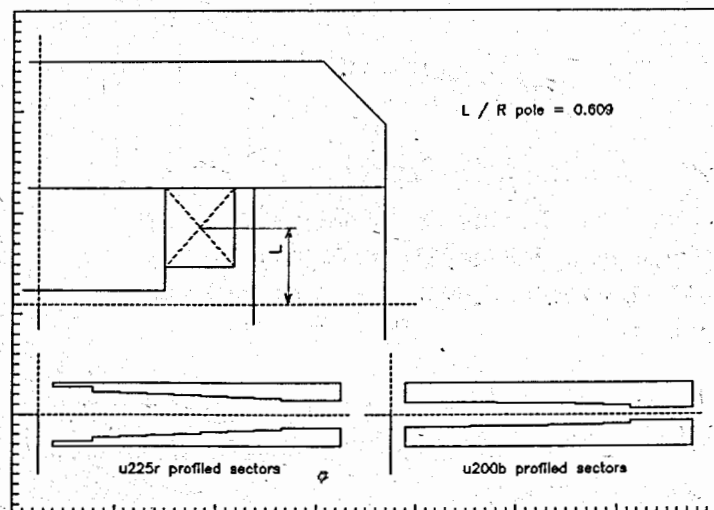


Рис. 9. Положение основной катушки и радиальная форма секторов у модельных магнитов У225Р и У200Б.

обмотки до медианной плоскости к радиусу  $R_{\text{пол}}$  полюсного наконечника не слишком отличался от величины 0,6 [рис. 9, 10].

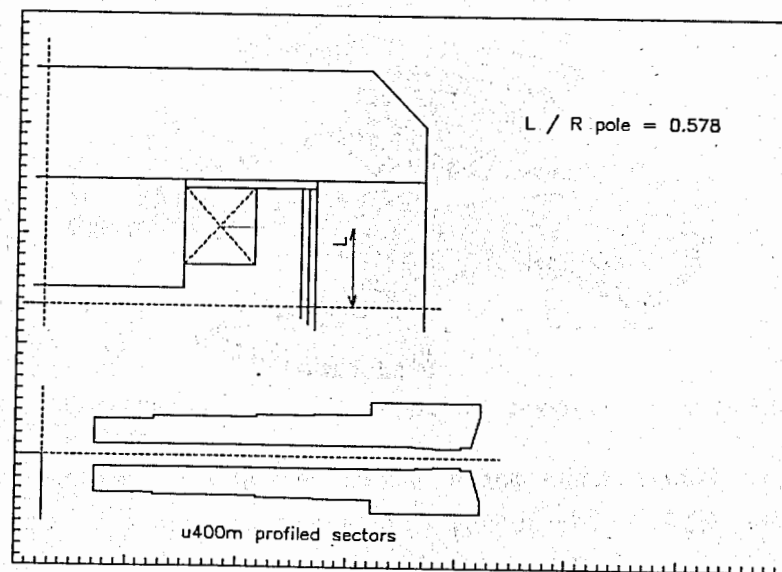


Рис. 10. Положение основной катушки и радиальная форма секторов у магнита У400М.

В случае модельных циклотронных магнитов У225Р и У200Б с диаметром полюсного наконечника 0,2 м радиальная зависимость среднего магнитного поля формируется изменением толщины сектора со стороны медианной плоскости магнита а азимутальная вариация магнитного поля достигается четырьмя прямыми секторами [рис. 9, 11, 12].

Из числа реально существующих циклотронных полномасштабных магнитов были проанализированы два магнита У400М и У400.

У магнита У400М с диаметром полюса 4 м радиальная форма среднего магнитного поля сформирована изменением толщины сектора со стороны полюса. Азимутальная вариация магнитного поля реализуется четырьмя спиральными секторами [рис. 10, 13]. Циклотронный магнит Е2 является, с точки зрения магнитной структуры его уменьшенной моделью в масштабе 1:2,92.



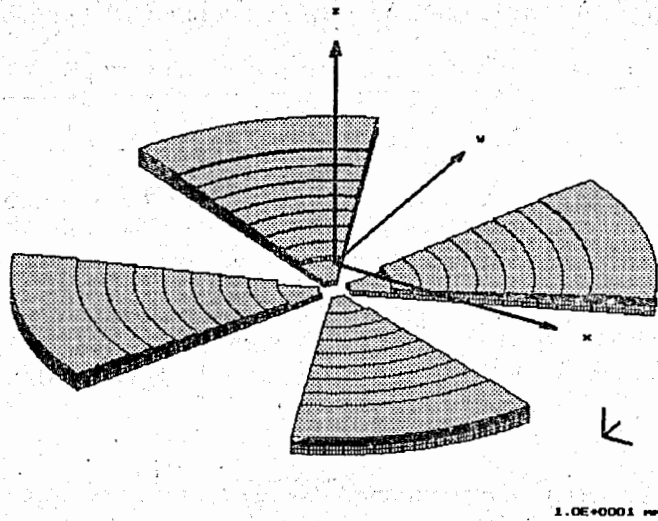


Рис. 11. Азимутальная форма прямых секторов у модельного магнита U225R.

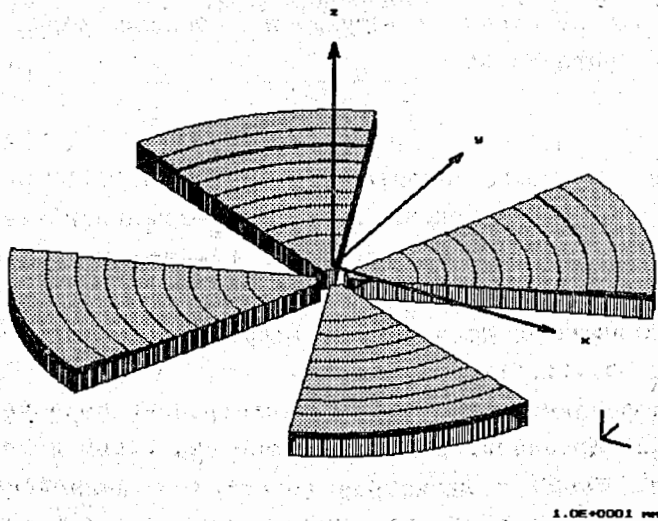


Рис. 12. Азимутальная форма прямых секторов у модельного магнита U200B.

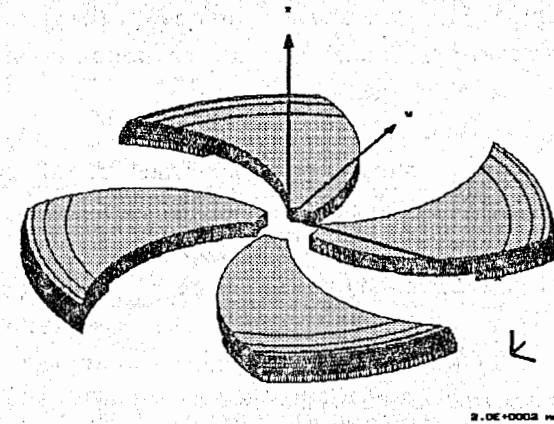


Рис. 13. Азимутальная форма спиральных секторов у магнита U200B.

В процессе анализа также были использованы некоторые данные, полученные из физических характеристик реально существующего циклотронного полномасштабного магнита U400 с диаметром полюса 4 м. Радиальная форма среднего магнитного поля у этого магнита сформирована плавным изменением толщины сектора со стороны его медианной плоскости. Азимутальная вариация магнитного поля реализуется четырьмя прямыми секторами.

Магнитное поле измерялось датчиками Холла в медианной плоскости воздушного зазора циклотронных магнитов.

### 8. Заключение

Полученная графическая, но главное аналитическая форма показанных зависимостей позволяет простыми расчетными средствами, уже в начальных фазах расчета магнитной структуры циклотронного магнита, достаточно точно определить и оптимизировать ее основные характеристики.

Зависимость  $\langle B \rangle = f(NI/d_{cp})$  [рис.1] позволяет оптимально выбирать уровень магнитного поля магнита, ее обратная форма  $NI/d_{cp} = f(\langle B \rangle)$  - оценить мощность магнита и может быть использована для предварительного формирования радиальной зависимости магнитного поля изменением толщины сектора.

Зависимость разницы магнитного поля  $\Delta B_{\text{дол}}^{\text{сект}} = f(\langle B \rangle, d_{\text{дол}}/d_{\text{сект}})$  [рис.4,5] позволяет предварительно формировать радиальную зависимость среднего магнитного поля изменением азимутального угла сектора.

Вместе с зависимостью флаттера  $F = f(\langle B \rangle, d_{\text{дол}}/d_{\text{сект}})$  [рис.6] позволяет оценить фокусирующие свойства магнитной структуры и выбрать подходящую ей геометрию воздушных зазоров долины и сектора.

Зависимость радиального подъема  $\Delta B_{\text{Рвыб}} = f(B_{\text{центр}})$  и вариации  $\text{var}\langle B \rangle_R = f(\text{var}B_{\text{центр}})$  [рис.7,8] среднего магнитного поля позволяет формировать изохронное магнитное поле с использованием эффекта автоматического выравнивания этого поля с увеличением насыщения магнита.

#### Литература:

1. Heikkinen, P., JYFL Annual Report 1987, p.16.
2. Heikkinen, P., The Jyväskylä K 130 Cyclotron Magnet (Field Calculations), Minisymposium on Numerical Methods for Semiconductors and Magnets, University of Jyväskylä, Department of Mathematics, 26.-27.5.1988.
3. Gordon, M.M., D.A.Johnson, Particle Accelerators 10 (1980) 217.
4. Pausch G., Semi-3d Magnetic Field Calculations for Cyclotrons with Profiled Sectors, CINR Annual Report 1989, Rossendorf.
5. Holsinger, R.F., Chr. Inselin, The CERN-POISSON Program Package (POISCR), User Guide, Aug.1983.
6. Pausch G., Franko J., Calculation of the azimuthally averaged magnetic field in sector-focused cyclotrons, CINR Annual Report 1989, Rossendorf.
7. Pausch G., BCAL - A Program Package for Semi-3D Magnetic Field Calculations and Analysis of Measured Field Maps in Sector- focussed Cyclotrons, CINR Annual Report 1989, Rossendorf.
8. Иванов Э.Л., Частное сообщение.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 марта 1992 года.

Гульбемян Г.Г., Франко Й.  
Алгоритм синтеза и анализа  
характеристик магнитных структур  
изохронных циклотронов с цилиндрическими полюсами

P9-92-129

Проведен анализ некоторых зависимостей магнитных структур циклотронных магнитов компактного типа с цилиндрическими полюсами, изготовленных из магнитного железа с содержанием углерода от 0,03 до 0,07%.

В результате анализа экспериментальных данных были получены аналитические зависимости:

- среднего магнитного поля от характеристик питания и геометрии зазора,
- амплитуды азимутальной вариации поля и флаттера от величины среднего магнитного поля и соотношения геометрических зазоров в долине и между секторами,
- подъема радиального распределения среднего магнитного поля от поля в центре магнита,
- радиальной вариации среднего магнитного поля от вариации поля в центре магнита.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им Г.Н.Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1992

Перевод авторов

Gulbekyan G.G., Franko J.  
Algorithm of Synthesis and Analysis  
of Magnetic Structure Characteristics  
of Isochronous Cyclotrons with Cylindrical Poles

P9-92-129

The analysis of some magnetic structure dependencies of the compact cyclotron magnets with cylindrical poles made of magnetic iron with carbon content from 0.03 up to 0.07% is carried out.

As a result of the analysis of the experimental data the analytical dependencies are obtained:

- the mean magnetic field versus power characteristics and gap geometry;
- the amplitude of the azimuthal field variation and flutter versus value of the mean magnetic field and geometric gap relations in the valley and between sectors;
- radial distribution rise of the mean magnetic field versus field in the centre of a magnet;
- radial variation of the mean magnetic field versus field variation in the centre of a magnet.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1992