

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



С 345Г1  
3-328

20/7.75  
P9 - 8257

Н.Л.Заплатин, Е.В.Самсонов

194/2-75

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ  
ДЛЯ ВЫВОДА ЧАСТИЦ  
ИЗ ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ  
КОЛЬЦЕВОГО ЦИКЛОТРОНА  
МЕТОДОМ РАСШИРЕНИЯ ЗАМКНУТЫХ ОРБИТ

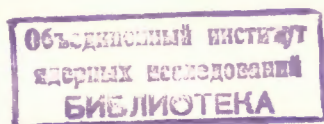
**1974**

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

P9 - 8257

Н.Л.Заплатин, Е.В.Самсонов

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ  
ДЛЯ ВЫВОДА ЧАСТИЦ  
ИЗ ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ  
КОЛЬЦЕВОГО ЦИКЛОТРОНА  
МЕТОДОМ РАСШИРЕНИЯ ЗАМКНУТЫХ ОРБИТ



Заплатин Н.Л., Самсонов Е.В.

Р9 - 8257

Выбор параметров магнитной системы для вывода частиц из электронной модели кольцевого циклотрона методом расширения замкнутых орбит

В работе приведены результаты расчетов по выбору параметров дополнительных токовых обмоток модели для создания требуемого изменения вариации магнитного поля на конечных радиусах.

Выполнен анализ возможных возмущений от различных элементов токовой системы. Предложенная система концентрических обмоток позволяет с большей точностью сформировать среднее магнитное поле модели.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований  
Дубна, 1974

Zaplatin N.L., Samsonov E.V.

Р9 - 8257

Choosing of the Parameters of the Magnetic System for Particle Extraction from the Ring Cyclotron Electron Model by the Method of Closed Orbit Expansion

The results are presented of calculations for choosing the parameters of complementary windings of the model to create the required changing in the magnetic field variations at final radii. The analysis of possible perturbations arising from different elements of current system is performed. The suggested system of concentric windings allows the average magnetic field to be formed more accurately.

Communications of the Joint Institute for Nuclear Research.  
Dubna, 1974

## Введение

Из теоретического исследования <sup>1/</sup> известно, что в ускорительных установках с вариацией магнитного поля /циклотрон, фазотрон/ при уменьшении глубины вариации вдоль радиуса ускорителя происходит расширение замкнутых орбит, что может быть использовано для эффективного вывода частиц из ускорителей с большой ( $\epsilon \sim 1$ ) величиной вариации магнитного поля.

Для экспериментального исследования этого эффекта на электронной модели кольцевого циклотрона /ЭМКЦ/<sup>2,3/</sup> Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ создана система, позволяющая регулировать характер изменения вариации на конечных радиусах.

На рис. 1 /кривые 5 и 6/ показаны зависимости основной, 8-ой гармоники поля и ее фазы от радиуса.

Для обеспечения разделения орбит  $\Delta r \approx 3$  см необходимо сформировать вариацию магнитного поля для  $r =$

$= 97,5$  см так, чтобы  $\frac{dH_8}{dr} = -2,7$  Э/см при примерно

постоянной фазе основной гармоники, т.е.  $\frac{d\phi_8}{dr} = 0$ .

### 1. Способ создания спада вариации

Рассматривались два способа создания необходимого спада вариации.

Первый заключался в формировании нужной величины амплитуды 8-ой гармоники во всем диапазоне радиусов,

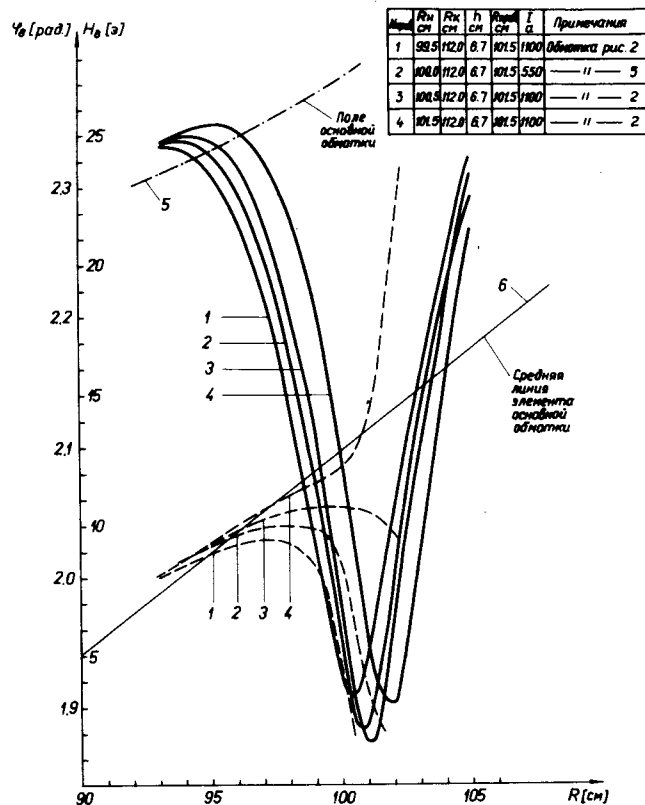


Рис. 1. Амплитуда /—/ и фаза /----/ 8-ой гармоники поля ЭМКЦ для  $I_{осн.} = 766$  А и параметров дополнительной вариационной обмотки, приведенных в таблице.

включая конечные, с помощью плоской обмотки с переменной угловой протяженностью между проводниками. Такая обмотка, благодаря ее плоской структуре, могла быть сравнительно просто изготовлена.

Второй подход состоял в выборе вариационной обмотки, дополнительной к уже существующей в ЭМКЦ и имеющей целью создание локального изменения вариации магнитного поля в зоне конечных радиусов  $/90 \div 100/$  см.

Выбор конфигураций обмоток в обоих случаях проводился на ЭВМ с использованием программ LININT и

VACUW соответственно. Первая программа на основе закона Био-Савара позволяет рассчитывать магнитное поле, создаваемое линейным током произвольной формы, и проводить гармонический анализ рассчитанного поля. Вторая программа производит расчет гармоник магнитного поля, создаваемого несколькими периодическими обмотками, состоящими из дуг окружностей и соединяющих их отрезков спиралей Архимеда. /Краткие описания программ даны в приложении/.

В результате проведенных расчетов была показана невозможность формирования необходимого градиента спада вариации с помощью плоской обмотки вследствие того, что по конструктивным соображениям она не могла быть расположена на расстоянии меньше чем 6,5 см от медианной плоскости. Следует также отметить, что высшие гармоники поля, создаваемые такой обмоткой, достигают значительных величин. Например, амплитуда 16-ой гармоники в среднем находилась на уровне 50% от амплитуды основной, 8-ой гармоники, что приводит к усложнению анализа движения частиц в таком поле.

Ввиду этого более подходящим оказался второй способ - с использованием дополнительной вариационной

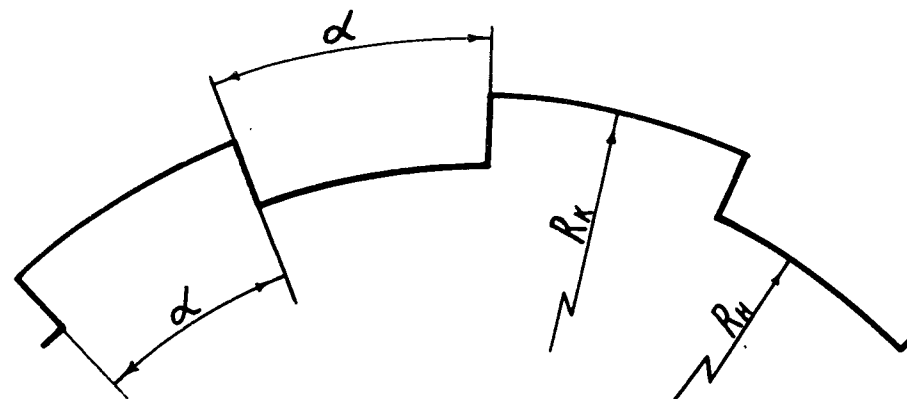


Рис. 2. Конфигурация дополнительной вариационной обмотки.

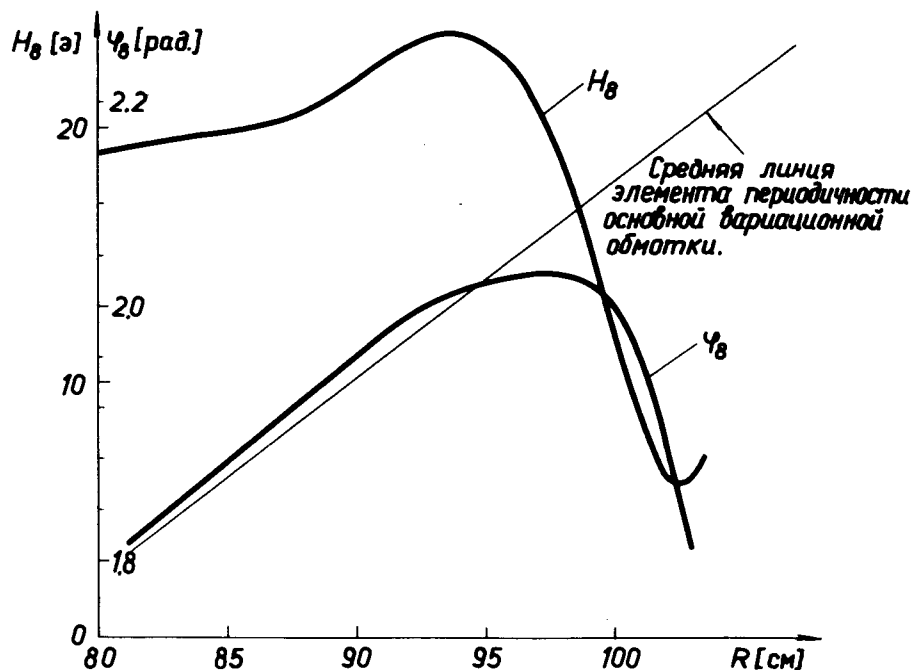


Рис. 3. Зависимость амплитуды и фазы 8-ой гармоники поля от радиуса для выбранной конфигурации дополнительной вариационной обмотки.

обмотки. Отметим, что такая обмотка дает возможность исследования различных режимов вывода частиц путем регулирования спада вариации. Дополнительная обмотка для создания спада вариации представляет собой систему двух симметрично расположенных относительно медианной плоскости одиночных проводников, уложенных по радиальным линиям и дугам окружностей /рис. 2/. В процессе выбора геометрических размеров этой обмотки радиальное и азимутальное расположение дуг окружностей неоднократно изменялось в соответствии с результатами численных расчетов движения частиц. Для иллюстрации на рис. 1 приведен ряд кривых спада вариации, полученных при фиксированном местоположении конечного радиуса обмотки и радиуса пересечения средних линий элементов

периодичности основной и дополнительной вариационных обмоток /радиус привязки/. Геометрические размеры обмоток указаны в таблице на рис. 1.

Выбранные для ЭМКЦ геометрические размеры обмотки следующие: дуги окружностей расположены на радиусах  $R_H = 100$  см и  $R_K = 111,5$  см, расстояние обмотки от медианной плоскости  $h = 7,05$  см, радиус привязки  $R_{\text{прив}} = 103,9$  см, угол между прямым и обратным проводниками элемента периодичности составляет  $\alpha = 22,5^\circ$ .

На рис. 3 приведен график амплитуды и фазы 8-ой гармоники суммарного магнитного поля основной и дополнительной вариационных обмоток с токами  $I_{\text{осн}} = 760$  А и  $I_{\text{доп}} = 1000$  А соответственно. Приведенные характеристики вариации поля использовались для расчета расширения замкнутой орбиты. Была показана приемлемость полученных параметров вариации.

## 2. Компенсация среднего магнитного поля дополнительной вариационной обмотки

Среднее магнитное поле создается отрезками дуг окружностей обмотки. На рис. 4 приведено среднее магнитное поле обмотки при токе  $I_{\text{доп}} = 1000$  А. Кривые 1 и 2 представляют поля, создаваемые отрезками дуг, расположенных на радиусах 100 и 111,5 см соответственно, кривая 3 - суммарное поле.

Рассматривались разные способы компенсации среднего поля обмотки, а именно: с помощью 13 обмоток грубой коррекции <sup>2/</sup>, имеющих на модели /см. табл. 1/ концентрических витков, близко расположенных /~1 см/ к отрезкам дуг обмотки. Однако величина нескомпенсированного поля в любом из этих способов значительно превышала допуск на изохронное поле <sup>2/</sup>, величина которого в зоне радиуса 100 см составляет ~0,05 Э. Отметим, что компенсация поля такими системами обладает неудобствами, связанными с необходимостью перестройки системы питания обмоток при изменении тока дополнительной вариационной обмотки.

Таблица 1. Параметры обмоток грубой коррекции.

$N$ обмотки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$z$ , см	10	12	25	35	45	55	65	75	85	95	105	111,5	116,2
$h$ , см	6,4	12,75	12,75	12,75	12,75	12,75	12,75	12,75	12,75	12,75	12,75	6,4	7,7
$W$ витков	1	150	30	30	30	30	30	60	60	62	62	1	1

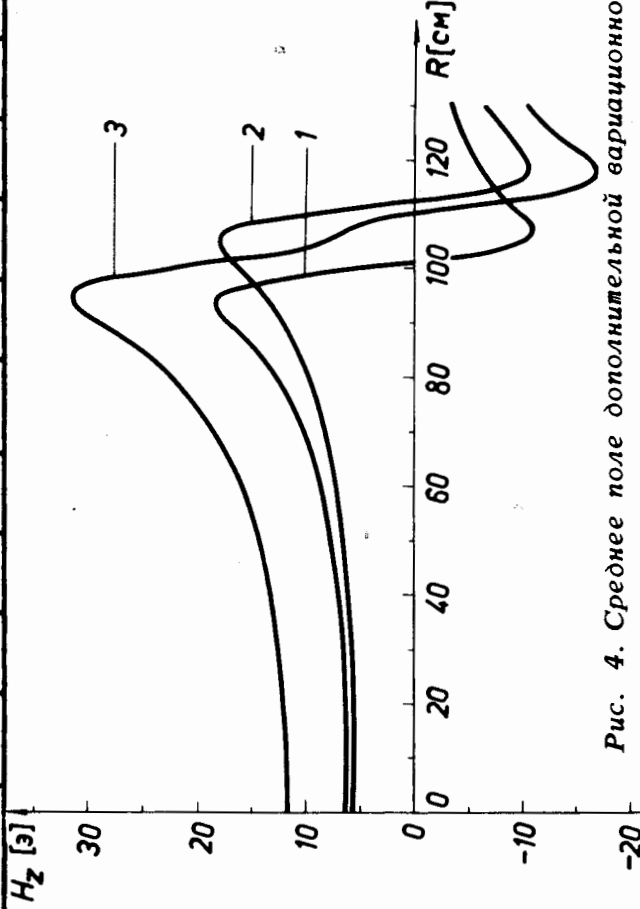


Рис. 4. Среднее поле дополнительной вариационной обмотки.

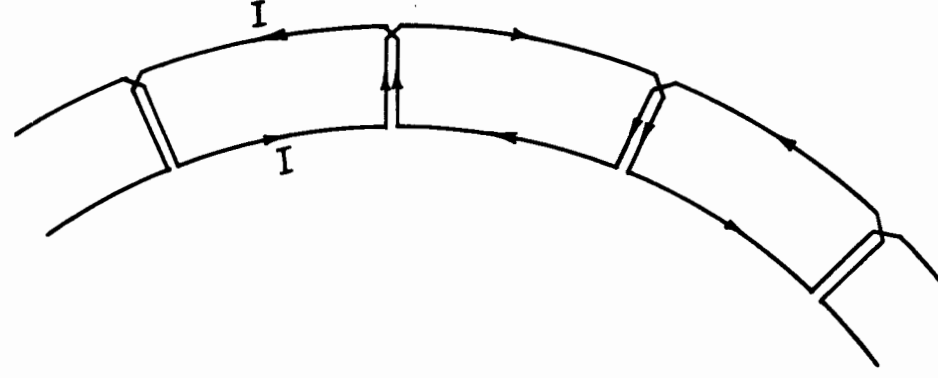


Рис. 5. Обмотка с полной компенсацией среднего поля.

Существенным преимуществом по сравнению с рассмотренной вариационной обмоткой и упомянутыми способами компенсации создаваемого ею среднего поля обладает вариационная обмотка, состоящая из двух идентичных ветвей, сдвинутых на полпериода системы /22,5°, с противоположными направлениями текущих в них токов /рис. 5/.

Во-первых, такая обмотка, при условии идентичности изготовления ветвей, в принципе, не создает среднего поля, т.е. отпадает задача компенсации, что значительно упрощает эксплуатацию дополнительной обмотки.

Во-вторых, для создания требуемой амплитуды 8-ой гармоники магнитного поля с помощью обмотки, состоящей из двух ветвей, требуется ток практически в два раза меньше, чем при использовании обмотки, приведенной на рис. 2.

Следует отметить, что, как видно из рис. 5, такая обмотка имеет пересечения проводников, лежащих в одной плоскости. Это обстоятельство и вызвало попытки использовать обмотку из одной ветви /рис. 2/ и компенсировать ее среднее поле.

### 3. Создание первой гармоники аксиальной составляющей поля на конечных радиусах $/80 \div 100/$ см

Искажение формы орбиты, имеющее целью приблизить частицы к дефлектору, может быть создано с помощью 1-ой гармоники аксиальной составляющей магнитного поля.

На рис. 6 изображена схема обмотки, предназначенной для создания первой гармоники. Обмотка состоит из четырех идентичных элементов, уложенных в одной плоскости по дугам окружностей и радиальным линиям. Азимутальный размер одного элемента, составляющий  $120^\circ$ , был выбран из условия отсутствия 3-ей гармоники, создаваемой обмоткой. Токи в диаметрально про-

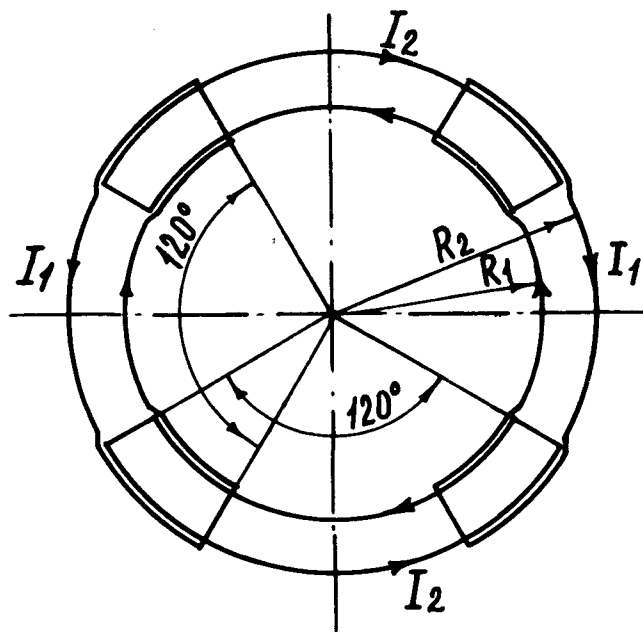


Рис. 6. Обмотка для создания 1-ой гармоники магнитного поля.

	1	2	3	4
$R_1$ см	85	90	90	85
$R_2$ см	99	110	110	110
$h$ см	7	18	32	18
$I_1 = I_2$ а	5	10	10	10

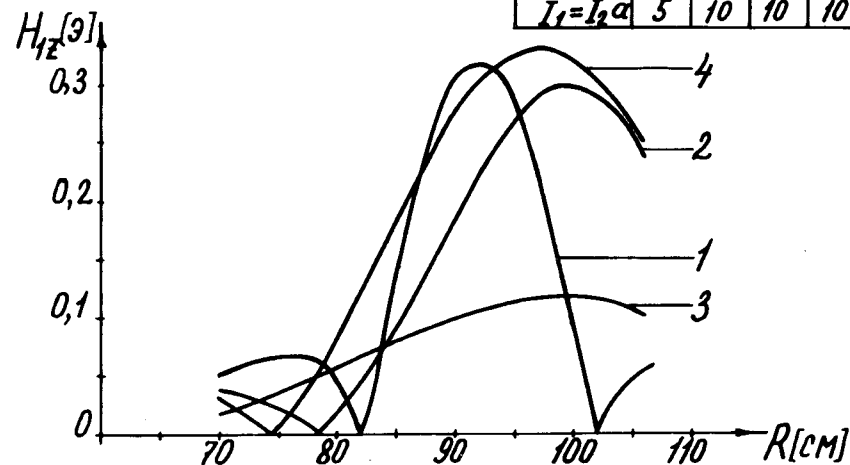


Рис. 7. Радиальные зависимости амплитуды 1-ой гармоники обмоток рис. 6.

тивоположных элементах равны по величине и противоположны по направлению. Регулировка фазы 1-ой гармоники достигается за счет изменения тока в соседних элементах.

Заметим, что такая обмотка также не создает среднего поля. На рис. 7 приведены кривые амплитуд 1-ой гармоники в зависимости от радиуса для обмоток разных радиальных размеров и расположенных на разных расстояниях от медианной плоскости. Выбранной конфигурации обмотки соответствует кривая 3.

### 4. Создание изохронного поля ЭМКЦ

Наряду с выбором способа создания спада вариации магнитного поля были проведены детальные расчеты полей некоторых элементов магнитной системы ЭМКЦ.

Таблица 2

Распределение токов в обмотках грубой коррекции

N	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	14
IWα	71,50	79,26	0,50	14,07	10,06	8,65	6,84	2,28	-1345	-8,50	1000.

Таблица 3

Распределение токов в обмотках тонкой коррекции

N	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
IWα	.50	-6.4	-1.7	.6	1.5	2.7	2.8	2.6	2.3	2.5	2.7	2.0

N	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	20	21	22	23	24
IWα	2.2	1.8	1.5	2.0	1.0	.6	-1.3	.8	-3.4	-3.4	-10.0	13.4

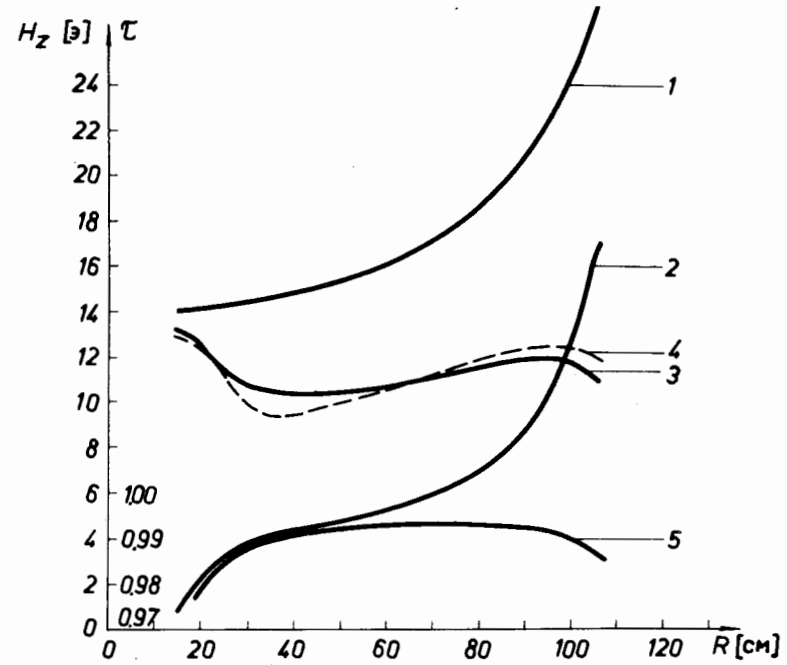


Рис. 8. Формирование изохронного поля.

В частности, были рассчитаны поля токовых вводов обмоток грубой коррекции №1,2,3/см. табл. 1/ и показано, что вносимые этими элементами искажения магнитного поля превышают допуски.

Ввиду этого оказалось целесообразным исключить из схемы создания изохронного поля эти обмотки при введении многовитковой обмотки грубой коррекции №14, располагаемой на расстоянии  $h = 27$  см от медианной плоскости и имеющей радиус  $r = 122$  см.

На рис. 8 приведено необходимое изохронное поле /кривая 1/, рассчитанное по формуле:

$$H(r) = \frac{H_0 \cdot r(r)}{\sqrt{1 - \left[ \frac{r}{r_\infty} r(r) \right]^2}},$$

где  $H_0 = 14,06$  Э,  $r_\infty = 121,226$  см,  $r(r)$  характеризует из-



менение среднего радиуса равновесной орбиты ввиду присутствия вариации /кривая 5/, кривая 2 - среднее поле, создаваемое вариационной обмоткой при токе  $I_{осн} = 766$  А, кривая 3 - разность кривых 1 и 2. На этом же рисунке показан результат /кривая 4/ первого этапа формирования - выбора оптимальных значений токов в обмотках грубой коррекции №3 и №14 / $I_3 = 114$  А,  $I_{14} = 1000$  А/. Поле, характеризуемое разностью кривых 3 и 4 рис. 8 формировалось как с помощью оставшихся обмоток грубой коррекции, так и обмоток тонкой коррекции /табл.2 и 3/. Из результата формирования, приведенного на рис. 9, следует, что среднее поле создано в обоих случаях с необходимой точностью на всех радиусах.

В заключение авторы выражают благодарность В.П.Дмитриевскому и В.В.Кольге за обсуждение результатов, изложенных в данной работе.

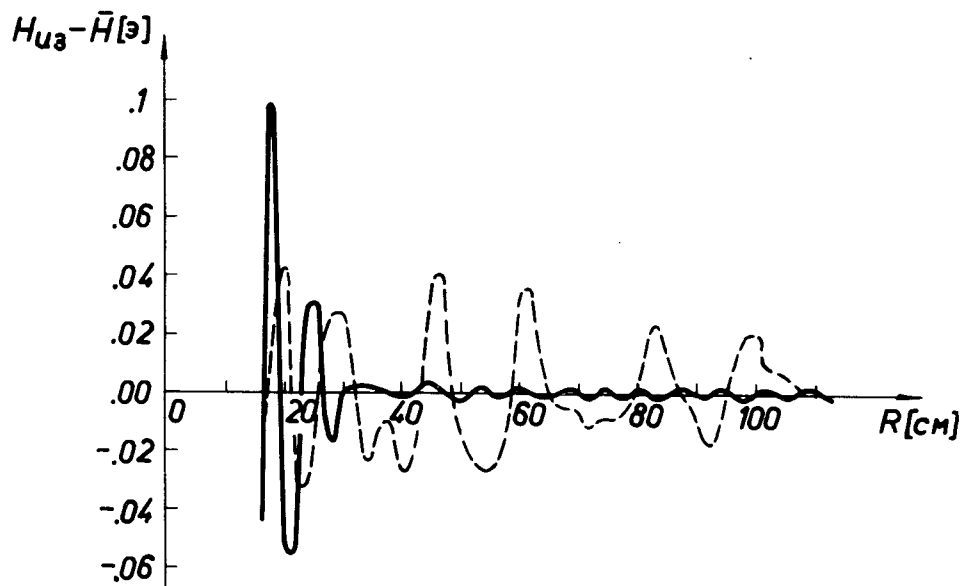


Рис. 9. Отклонение сформированного поля от изохронного. — использованы обмотки тонкой коррекции. --- использованы обмотки грубой коррекции.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Программа LININT

Программа позволяет рассчитывать магнитное поле железно-токовой структуры, расположенной между ферромагнитными плоскими поверхностями. Счет может вестись для токовых проводников конечной длины точечного поперечного сечения и ферромагнитных брусков в форме параллелепипеда в предположении их равномерной намагниченности. Существует возможность проведения гармонического анализа рассчитанного поля. Программа написана на языке FORTRAN для машин СДС-6200 и БЭСМ-6.

В данной работе использовалась только часть программы, рассчитывающая магнитное поле линейного тока и проводящая затем гармонический анализ.

По закону Био-Савара магнитное поле  $d\vec{H}$ , создаваемое в точке  $M/x_0, y_0, z_0$  /рис. 10/ элементом тока длиной  $|d\vec{\ell}|$ , по которому течет ток  $I$ , может

быть записано в виде  $\vec{dH} = k \cdot I \cdot \frac{[d\vec{\ell} \cdot \vec{r}]}{r^3}$ , где  $k$  -

коэффициент, зависящий от системы единиц,  $\vec{r}$  - радиус-вектор, соединяющий элемент тока и точку наблюдения.

Для компонент поля, создаваемого всем проводником, имеем:

$$H_x = k \cdot I \cdot \left[ \oint \frac{r_z}{r^3} dl_y - \oint \frac{r_y}{r^3} dl_z \right],$$

$$H_y = k \cdot I \cdot \left[ \oint \frac{r_x}{r^3} dl_z - \oint \frac{r_z}{r^3} dl_x \right],$$

$$H_z = k \cdot I \cdot \left[ \oint \frac{r_y}{r^3} dl_x - \oint \frac{r_x}{r^3} dl_y \right].$$

Геометрия токовых проводников задается таблично. Достижение необходимой точности при взятии криволинейных интегралов делается автоматически. Гармонический анализ поля проводится по формулам Бесселя.

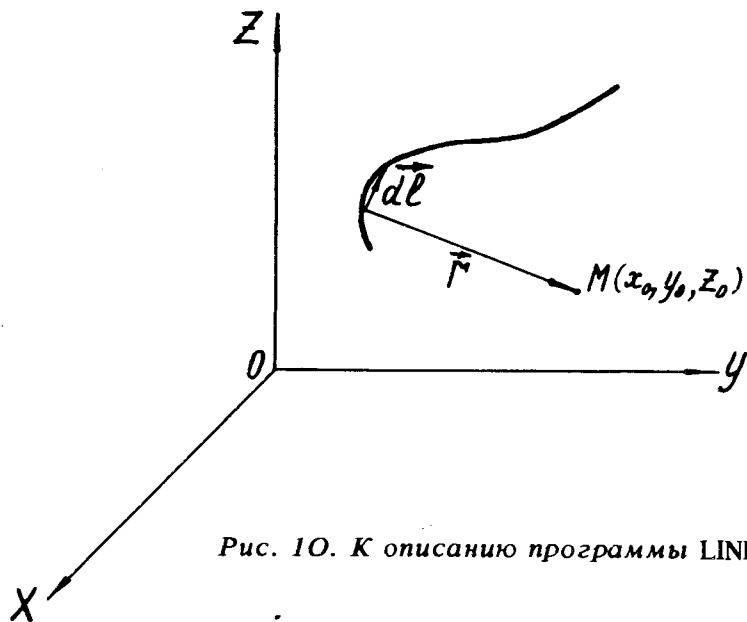


Рис. 10. К описанию программы LININT.

### Программа VACUW

Программа рассчитывает среднее значение, амплитуды и фазы гармоник магнитного поля, создаваемого несколькими периодическими токовыми системами, состоящими из дуг окружностей и спиралей Архимеда. Программа написана на языке FORTRAN для машин СДС-6200 и БЭСМ-6.

Магнитное поле элемента периодичности системы представляется в виде

$$H(r, \phi) = H_0(r) + \sum_{m=1}^{\infty} H_m \cos(\beta_m - m\phi),$$

$$H_m = \sqrt{(A_{m1} + A_{m2})^2 + (B_{m1} + B_{m2})^2},$$

$$\beta_m = \arctg \frac{B_{m1} + B_{m2}}{A_{m1} + A_{m2}}.$$

где  $m$  - номера гармоник,  $A_{m1}, B_{m1}, A_{m2}, B_{m2}$  - фурье-компоненты поля концентрических и спиральных участков элемента периодичности. Предполагается, что средняя линия элемента периодичности описывается в полярной системе координат уравнением

$$r = N\lambda(\phi - \theta_0), \quad \phi \geq \theta_0,$$

где  $N$  - число элементов периодичности,  $\theta_0$  - угол между средней линией элемента и осью  $\phi = 0$  в начале координат,  $\lambda$  - параметр спирали Архимеда.

Расчетные формулы /4/:

$$\begin{cases} A_{m1} \\ B_{m1} \end{cases} = -\frac{0,4I}{m\pi\sqrt{r}} \sum_{i=1}^2 \frac{\sin(ma_i/2)}{\sqrt{R_i}} \left\{ \frac{2R_i}{r} (x_i^2 + x_i \frac{dx_i}{dr} - 1) \times \right.$$

$$\left. \times \frac{dQ_{m-\frac{1}{2}}(x_i)}{dx_i} + Q_{m-\frac{1}{2}}(x_i) \left[ \begin{array}{l} \cos(m\beta(r'_i)) \\ \sin(m\beta(r'_i)) \end{array} \right] \right\},$$

$$\begin{cases} A_{m2} \\ B_{m2} \end{cases} = -\frac{0,4I}{\pi\sqrt{r}} \frac{R_K}{R_H} \sin\left(\frac{ma}{2}\right) \left\{ \frac{2m}{r} Q_{m-\frac{1}{2}}(x) \left[ \begin{array}{l} \cos(m\beta(r')) \\ \sin(m\beta(r')) \end{array} \right] - \right.$$

$$\left. + \frac{1}{N\lambda} \left[ 2\left(x - \frac{r'}{r}\right) \frac{dQ_{m-\frac{1}{2}}(x)}{dx} + Q_{m-\frac{1}{2}}(x) \right] \cdot \left[ \begin{array}{l} \sin(m\beta(r')) \\ \cos(m\beta(r')) \end{array} \right] \right\} \frac{dr'}{\sqrt{r'}}.$$

Здесь:

$$\beta(r'_1) = \frac{R_H}{N\lambda} + \theta_0 - \frac{\pi}{N}, \quad x = \frac{r'^2 + r^2 + h^2(r')}{2rr'},$$

$$\beta(r'_2) = \frac{R_K}{N\lambda} + \theta_0, \quad \beta(r') = \frac{r'}{N\lambda} + \theta_0,$$

$\alpha_i$  - угловая протяженность дуги окружности на радиусе  $R_i$ ,  $R_1 = R_H$  - начальный радиус обмотки,  $R_2 = R_K$  - конечный радиус обмотки,  $r'$  - текущий радиус интегрирования,  $r$  - радиус наблюдения,  $h(r')$  - высота обмотки над медианной плоскостью на радиусе  $r'$ ,  $Q_{m-\frac{1}{2}}(x)$ ,  $Q'_{m-\frac{1}{2}}(x)$  - сферическая функция Лежандра второго рода и ее производная.

Для их расчета использовались представления:

$$Q_{m-\frac{1}{2}}(x) = \int_0^{\pi} \frac{\cos m a d a}{\sqrt{2x - \cos a}},$$

$$Q'_{m-\frac{1}{2}}(x) = - \int_0^{\pi} \frac{\cos m a d a}{\sqrt{(2x - \cos a)^3}}.$$

#### Литература

1. В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, Н.И.Полумордвинова. Сообщение ОИЯИ, Р9-6733, Дубна, 1972.
2. С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, Л.А.Саркисян. Препринт ОИЯИ, Р9-3448, Дубна, 1967.
3. В.Н.Аносов, А.Т.Василенко, С.Б.Ворожцов и др. Электронная модель релятивистского циклотрона с жесткой фокусировкой. АЭ, 25, вып. 6, 539 /1968/.
4. С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин, В.С.Рыбалко, Л.А.Саркисян. Препринт ОИЯИ, Р-2852-1, Дубна, 1966.

Рукопись поступила в издательский отдел  
6 сентября 1974 года.