

B-751

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P - 2852-1



ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

С.Б. Ворожцов, Н.Л. Заплатин, В.С. Рыбалко,
Л.А. Саркисян

РАЗРАБОТКА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ
РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЦИКЛОТРОНА (ЭМРЦ)

1966

P - 2852-1

4435/3 кр.

С.Б. Ворожцов, Н.Л. Заплатин, В.С. Рыбалко,
Л.А. Саркисян

РАЗРАБОТКА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ
РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЦИКЛОТРОНА (ЭМРЦ)

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
ИЛИИ

В в е д е н и е

Одной из основных задач при разработке сильноточных ускорителей типа мезонных фабрик является вывод частиц из камеры ускорителя.

В работе ^{/1/} показано, что при введении на конечных радиусах релятивистского циклотрона на энергию протонов 700 Мэв ^{/2/} четвертой гармоники в структуру магнитного поля наблюдается резонансная раскачка радиальных колебаний, которую можно использовать для высокоэффективного вывода частиц. Для экспериментального изучения этого метода вывода в Лаборатории ядерных проблем спроектирована и сооружается электронная модель релятивистского циклотрона (ЭМРЦ) с коэффициентом подобия $K = 3,1984$. Модель представляет собой электронный циклотрон на энергию 380 кэв ($\beta = 0,819$), соответствующую энергии протонов 700 Мэв.

Настоящая работа посвящена разработке магнитной системы ЭМРЦ. Для формирования магнитного поля в модели используются токовые системы. На основе проведенных расчетов выбраны параметры всех обмоток, которые позволят обеспечить изохронное ускорение, а также создать условия резонансной раскачки радиальных колебаний ($Q_r = 2,0$) на предельных радиусах. Экспериментальное изучение условий резонансной раскачки на модели позволит определить эффективность предложенного метода вывода пучка из релятивистского циклотрона.

1. Требования к магнитному полю ЭМРЦ

Магнитное поле электронной модели в плоскости симметрии $z = 0$ имеет вид:

$$H_z(r, \Phi) = H(r) \left[1 + \epsilon(r) \sin \left(\frac{r}{\lambda} - N\Phi \right) \right], \quad (1)$$

где $2\pi\lambda$ и N — радиальный шаг и периодичность структуры магнитного поля.

Радикальные зависимости изохронного среднего поля $H(r)$ и требуемой вариации $\epsilon(r)$ рассчитывались по формулам

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

$$\epsilon(r) = \frac{N\lambda}{r} \left\{ (Q_x^2 + n) \cdot \frac{1 - \frac{1+n}{N^2}}{1 - \frac{1+n}{2N^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{N\lambda}{r} \right)^2} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

где $r(r)$ характеризует изменение среднего радиуса равновесной орбиты и может быть представлена следующим образом ^{3/}:

$$r(r) = 1 - \frac{\epsilon^2}{2(N^2 - 1 - n)(1+n)} \left[2 - \frac{N^2}{2(N^2 - 1 - n)} + n + r \frac{\epsilon'}{\epsilon} \right] + \frac{\epsilon^2 N^2}{4(N^2 - 1 - n)^2}$$

В первом приближении величины n , n' , ϵ и ϵ' , необходимые для расчета $r(r)$, определялись из (2), (3) при $r(r) = 1$:

$$n = \frac{\left(\frac{r}{r_\infty} \right)^2}{1 - \left(\frac{r}{r_\infty} \right)^2}, \quad n' = \frac{2r_\infty^2}{r^3} n^2, \quad \epsilon' = \frac{\epsilon}{2(Q_x^2 + n)} \left[n' - \frac{2r}{N^2 \lambda^2} \epsilon^2 \right]$$

Для сохранения постоянства частоты аксиальных колебаний в процессе ускорения при расчете вариации поля по формуле (3) величина показателя поля принималась равной

$$n = \frac{\frac{r r'(r)}{r(r)} + \frac{r^2 r'^2(r)}{r_\infty^2}}{1 - \frac{r^2 \cdot r'^2(r)}{r_\infty^2}}$$

где

$$r'(r) = - \frac{\epsilon^2}{2(N^2 - 1 - n)(1+n)} \left\{ \left[2 \frac{\epsilon'}{\epsilon} - n' \frac{N^2 - 2(1+n)}{(N^2 - 1 - n)(1+n)} \right] \cdot \left[2 - \frac{N^2}{2(N^2 - 1 - n)} + n + r \frac{\epsilon'}{\epsilon} \right] + n + r \frac{\epsilon''}{\epsilon} + \frac{\epsilon'}{\epsilon} (1 - r \frac{\epsilon'}{\epsilon}) - \frac{n'}{2} \frac{N^2}{(N^2 - 1 - n)^2} \right\} + \frac{N^2 \epsilon^2}{2(N^2 - 1 - n)^2} \left(\frac{\epsilon'}{\epsilon} + \frac{n'}{N^2 - 1 - n} \right)$$

$$\epsilon'' = \frac{\epsilon}{Q_x^2 + n} \left\{ \frac{\epsilon'}{\epsilon} \left[\frac{\epsilon'}{\epsilon} (Q_x^2 + n) - n' \right] + \frac{n'}{2} - \frac{\epsilon^2}{N^2 \lambda^2} (1 + 2r \frac{\epsilon'}{\epsilon}) \right\}$$

$$n'' = \frac{n'}{r} \left(2r \frac{n'}{n} - 3 \right)$$

Для параметров ускорителя, приведенных в таблице 1, зависимости $H(r)$ и $\epsilon(r)$, рассчитанные по формулам (2) и (3), показаны на рис. 1 (кривые 1 и 2). Кривые (3) и (4) характеризуют отличие среднего поля и вариации от приведенных при пренебрежении влиянием вариации на форму замкнутой орбиты. Эти отличия сравнимы с допусками и должны быть учтены при формировании поля.

Для выбранного значения $\Delta Q_z = + 0,08$ допуск на величину вариации магнитного поля на конечном радиусе равен $+ 0,07$ э. Допуск на величину среднего поля при максимальном наборе энергии за оборот $2eV_0 = 1,5$ кэв составляет $+ 2,5 \cdot 10^{-3}$.

Резонансные условия на конечном радиусе создаются за счет введения 4-ой гармоник. В этом случае для поля вида ^{1/1}

$$H_z(r, \Phi) = H(r) \left[1 + \epsilon_N \sin(\beta_N - N\Phi) + \epsilon_{N/2} \sin(\beta_{N/2} - \frac{N}{2}\Phi) \right],$$

Таблица 1

Энергия ускоренных электронов	$W_k = 380$ кэв
Энергия инжекции	$W_H = 5,46$ кэв
Радиус инжекции	$r_H = 18,0$ см
Радиус конечной орбиты	$r_k = 101,7$ см
Радиус, соответствующий бесконечной энергии $\gamma_\infty = \frac{E_0}{eH_0}$	$r_\infty = 124,138$ см
Напряженность изохронного магнитного поля в центре	$H_0 = 13,73$ э
Напряженность магнитного поля на радиусе инжекции	$H(r_H) = 13,87$ э
Напряженность магнитного поля на конечном радиусе	$H(r_k) = 23,89$ э
Число элементов периодичности	$N = 8$
Параметр спирали $a = N\lambda$	$\lambda = 2,408$ см
Вариация поля на конечном радиусе	$\epsilon(r_k) = 0,273$
Частота аксиальных колебаний	$Q_z = 0,3 \pm 0,09$
Частота радиальных колебаний	$1,011 \leq Q_r \leq 1,8$
Максимальный набор энергии за оборот	$2eV_0 = 1,5$ кэв

частоты бетатронных колебаний определялись по формулам :

$$\cos \frac{4\pi}{N} Q_r = \cos \frac{4\pi}{N} \sqrt{A_r} - \frac{4\pi}{N^3} \frac{\sin \frac{4\pi}{N} \sqrt{A_r}}{\sqrt{A_r}} \cdot \frac{B_{1r}^2 + B_{2r}^2}{1 - \frac{16}{N^2} A_r} \quad (5)$$

$$\cos \frac{4\pi}{N} Q_x = \cos \frac{4\pi}{N} \sqrt{A_x} - \frac{4\pi}{N^3} \frac{\sin \frac{4\pi}{N} \sqrt{A_x}}{\sqrt{A_x}} \frac{B_{1x}^2 + B_{2x}^2}{1 - \frac{16}{N^2} A_x} .$$

$$A_r = Q_{r0}^2 - \frac{2\epsilon_4 r^2 \beta_4'^2}{N^2 - 4(1+n)} + \frac{2\epsilon_8 \epsilon_4^2 r^3}{[N^2 - 4(1+n)]^2} (\beta_8'^3 - \frac{\beta_4'^3}{2}) \cos(2\beta_4 - \beta_8) ,$$

$$B_{1r} = \epsilon_4 r \beta_4' \cos \beta_4 - \frac{2\epsilon_4 \epsilon_8 r^2}{N^2 - 4(1+n)} (\beta_8'^2 + \frac{\beta_4'^2}{4}) \cos(\beta_8 - \beta_4) ,$$

$$B_{2r} = \epsilon_4 r \beta_4' \sin \beta_4 - \frac{2\epsilon_4 \epsilon_8 r^2}{N^2 - 4(1+n)} (\beta_8'^2 + \frac{\beta_4'^2}{4}) \sin(\beta_8 - \beta_4) , \quad (6)$$

$$A_x = Q_{x0}^2 + \frac{2\epsilon_4 r^2 \beta_4'^2}{N^2 - 4(1+n)} - \frac{2\epsilon_8 \epsilon_4^2 r^3}{[N^2 - 4(1+n)]^2} (\beta_8'^3 - \frac{\beta_4'^3}{2}) \cos(2\beta_4 - \beta_8) ,$$

$$B_{1x} = -\epsilon_4 r \beta_4' \cos \beta_4 + \frac{2\epsilon_4 \epsilon_8 r^2}{N^2 - 4(1+n)} (\beta_8'^2 + \frac{\beta_4'^2}{4}) \cos(\beta_8 - \beta_4) ,$$

$$B_{2x} = -\epsilon_4 r \beta_4' \sin \beta_4 + \frac{2\epsilon_4 \epsilon_8 r^2}{N^2 - 4(1+n)} (\beta_8'^2 + \frac{\beta_4'^2}{4}) \sin(\beta_8 - \beta_4) ,$$

Q_{r0} , Q_{x0} — частоты бетатронных колебаний при $\epsilon_4 = 0$.

При $\beta_8 = 2\beta_4 = \frac{r}{\lambda}$ выражения (5) и (6) совпадают с формулами для частот, приведенными в работе /1/

Для изменения частоты $Q_r = 1,8$ до значения $Q_r = 2,0$ на конечном радиусе минимальное значение четвертой гармоники соответствует сдвигу фаз $\delta = \beta_4 - \beta_8 = \frac{\pi}{2}$ и при $\beta_8' - \beta_4' = \frac{1}{\lambda}$ равно $\epsilon_4 = 0,042$. Введение четвертой гармоники приводит к некоторому увеличению Q_x , что должно быть учтено при формировании основной гармоники поля.

Формирование магнитного поля ЭМРЦ

Формирование магнитного поля ЭМРЦ осуществляется с помощью следующих систем токовых обмоток (рис. 2).

1. Обмотка для создания основной гармоники магнитного поля.
2. Кольцевые обмотки грубой коррекции.
3. Кольцевые обмотки тонкой коррекции.
4. Обмотка для компенсации колебаний амплитуды и фазы основной гармоники.
5. Обмотка для создания 4-ой гармоники.
6. Обмотка для коррекции основной гармоники.

Обмотка для создания основной гармоники магнитного поля представляет собой систему двух симметрично расположенных относительно $z = 0$ одиночных проводников (ϕ 8 x 1,5 мм), уложенных по линиям спиралей Архимеда $r = N\lambda\Phi$ и дугам окружностей на радиусах $R_H = 10,0$ см и $R_L = 114,0$ см. Угол между прямым и обратным проводником элемента периодичности обмотки является постоянным и равным $\alpha = \frac{\pi}{N}$. Вертикальный зазор между проводниками $2h(r)$ изменяется в соответствии с требованиями к характеру зависимости вариации от радиуса. В этом случае, в отличие от способа формирования закона $\epsilon_s(r)$, при котором изменяется угол между прямыми и обратными проводниками при плоских вариационных обмотках ^{/4/}, в магнитном поле не появляется заметных высших гармоник. Это более точно моделирует магнитное поле РЦ, полученное на модели магнитной системы релятивистского циклотрона ^{/5/}.

Предварительное определение параметров обмотки производилось по формулам для расчета амплитуд гармоник от бесконечной системы прямолинейных проводников

$$H_{mN}(r) = \frac{0,8I}{m\lambda_{эф}} \cdot e^{-\frac{m}{\lambda_{эф}}h} \cdot \text{Sh}\left(mN \frac{\alpha}{2}\right), \quad (7)$$

где $m = 1, 2, 3 \dots$, $\lambda_{эф} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{N\lambda}{r}\right)^2}}$.

Расчет магнитного поля вариационной обмотки производился на основе закона Био-Савара в предположении, что ток протекает по осевой линии проводника. Магнитное поле элемента периодичности обмотки в плоскости $z = 0$ может быть записано в виде

$$\left. \begin{aligned} H(r, \Phi) &= H(r) + \sum_{m=1}^{\infty} H_m \cdot \text{Cos}(\beta_m - m\Phi) \\ H_m &= \sqrt{(A_{m1} + A_{m2})^2 + (B_{m1} + B_{m2})^2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\beta_m = \text{arc tg} \frac{B_{m1} + B_{m2}}{A_{m1} + A_{m2}}$$

где $m = 1, 2, 3 \dots$ - номер гармоники, A_{m1} , B_{m1} и A_{m2} , B_{m2} - компоненты Фурье поля концентрических и спиральных участков элемента периодичности,

$$\begin{pmatrix} A_{m1} \\ B_{m1} \end{pmatrix} = (-1) \frac{0,4I}{\pi\sqrt{r}} \frac{\sin(m\alpha/2)}{m} \sum_{k=1}^2 \frac{1}{\sqrt{R_k}} \left\{ \frac{2R_k}{r} (x_1^2 + x_1 \frac{dx_1}{dr} r - 1) \cdot \frac{d}{dx_1} Q_{m-\frac{1}{2}}(x_1) + Q_{m-\frac{1}{2}}(x_1) \right\} \begin{bmatrix} \cos m\beta(r'_1) \\ \sin m\beta(r'_1) \end{bmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} A_{m2} \\ B_{m2} \end{pmatrix} = (-1) \frac{0,4I}{\pi\sqrt{r}} \sin(m\alpha/2) \int_{R_H}^{R_k} \frac{2m}{r'} Q_{m-\frac{1}{2}}(x) \cos m\beta(r') \pm \frac{1}{a} [2(x - \frac{r'}{r}) \cdot \frac{d}{dx} Q_{m-\frac{1}{2}}(x) +$$

$$+ Q_{m-\frac{1}{2}}(x)] \cdot \begin{bmatrix} \sin m\beta(r') \\ \cos m\beta(r') \end{bmatrix} \frac{dr'}{\sqrt{r'}}.$$

Здесь $\beta(r'_1) = \frac{R_H}{a} + \theta_0 - \frac{\pi}{N}$, $\beta(r'_2) = \frac{R_k}{a} + \theta_0$, $\beta(r') = \frac{r'}{a} + \theta_0$,

θ_0 - угол между касательной к средней линии элемента периодичности и осью $\Phi = 0$

в начале координат, $Q_{m-\frac{1}{2}}(x)$ - сферическая функция Лежандра II-го рода аргумента

$$x = \frac{r'^2 + r^2 + h^2}{2r'r}.$$

Для гармонической обмотки, состоящей из N элементов периодичности, магнитное поле содержит только гармоники, кратные N , величина амплитуд которых в N раз больше амплитуд соответствующих гармоник для одного элемента периодичности. При

$a = \frac{\pi}{N}$ амплитуда основной гармоники максимальна, а все $2mN$ -гармоники

равны нулю.

Окончательный профиль вариационной обмотки $h(r)$ при токе $I_0 = 220$ а, приведенный в таблице 2, получен на основе расчета поля по формуле (8) на электронно-вычислительной машине (ЭВМ).

На рис. 3 (кривые 1 и 4) изображено отклонение фазы $\Delta\Phi_N = \frac{1}{N} [\beta_N(r) - \frac{r}{a}] - \frac{\pi}{2N}$ и отклонение амплитуды основной гармоники от требуемой для интервала радиусов

$\Delta r = (80 \pm 103)$ см. Видно, что отклонения имеют колебательный характер. Эффективное отклонение амплитуды основной гармоники от требуемой, полученное при учете характера зависимости фазы от радиуса, находится в пределах допусков (кривая 5). Однако для более точного моделирования динамики движения частиц в зоне вывода релятивистского циклотрона необходимо устранить колебательный характер амплитуды и фазы основной гармоники в ЭМРЦ.

Колебания амплитуды и фазы основной гармоники обусловлены краевым эффектом на

конечных радиусах. В случае неограниченной протяженности вариационной обмотки по радиусу ($0 - \infty$) амплитуда основной гармоники (A) определяется зависимостью $h(r)$, а ее фаза $\alpha = \frac{k}{\lambda}$. Поле конечной обмотки ($0 - R_k$) можно представить в виде

$$C \cdot \cos(\beta - N\Phi) = A \cdot \cos(\alpha - N\Phi) - B \cdot \cos(\gamma - N\Phi) \quad , \quad (8)$$

где B и γ — амплитуда и фаза основной гармоники поля для обмотки радиальной протяженности ($R_k - \infty$). Так как на конечных рабочих радиусах $B \ll A$, то

$$C = A - B \cos(\alpha - \gamma) + \frac{A}{2} \frac{B^2}{A^2} \sin^2(\alpha - \gamma) \quad ,$$

$$\beta = \alpha + \frac{B}{A} \sin(\alpha - \gamma) + \frac{1}{2} \frac{B^2}{A^2} \sin 2(\alpha - \gamma) \quad . \quad (10)$$

Видно, что в первом приближении при $(\alpha - \gamma) \rightarrow \pi$ влияние края сводится к колебательному характеру добавки с огибающими B и $\frac{B}{A}$ в амплитуде и фазе соответственно.

Компенсация колебаний может быть произведена путем введения в магнитную систему ЭМРЦ дополнительной обмотки. Такая компенсационная обмотка может быть выполнена в виде кругового проводника, элементы которого с азимутальной протяженностью $\frac{\pi}{N}$ расположены на различных высотах от медианной плоскости (рис. 2,4). Путем выбора тока и азимутального положения этой обмотки можно достаточно точно скомпенсировать колебательный характер амплитуды и фазы основной гармоники. Результат суперпозиции полей основной и компенсационной обмоток может быть представлен формулой, аналогичной (10). Вторые члены разложения, выражающие корректирующее действие поля компенсирующей обмотки на амплитуду и градиент фазы основной гармоники, представлены на рис. 3 (кривые 6,3). Видно, что при выбранных параметрах компенсационной обмотки ($R_H = 120,5$ см, $h_1 = 17,5$ см; $R_k = 121,5$ см, $h_2 = 32$ см;

$I_2 = 136$ А) колебания будут существенно сглажены. На рис. 5 приведены окончательные величины отклонения фазы основной гармоники от фазы спирали и его градиента (кривые 1 и 2), а также отклонение амплитуды гармоники от требуемой (кривая 3) при идеальной фазе. Кривая 4 показывает эффективное отклонение амплитуды 8-ой гармоники при учете некомпенсированного отклонения фазы, соответствующего кривой 1. Зависимость частот бетатронных колебаний от радиуса, рассчитанных по характеристическим показателям уравнения Матье для полученных характеристик поля и изохронного закона среднего поля, приведена на рис. 6 (кривые 1 и 3). Из этого рисунка видно, что на ко-

нечных радиусах ЭМРЦ частоты свободных колебаний близки к значениям частот в релятивистском циклотроне ^{/3/}.

При формировании магнитного поля вида (4) характер зависимости амплитуды 4-ой гармоники от радиуса должен быть выбран таким, чтобы зона действия нелинейного резонанса $Q_4 = 8/4$ находилась вблизи конечного радиуса ускорителя $r_k = 101,7$ см. Для выполнения этого условия максимум амплитуды 4-ой гармоники должен находиться на радиусе $r \geq r_k$, а спад амплитуды в область меньших радиусов должен быть достаточно резким.

Для сохранения $Q_4 = \text{const}$ в зоне действия 4-ой гармоники необходимо уменьшить амплитуду 8-ой гармоники.

Для создания 4-ой и коррекции 8-ой гармоник в ЭМРЦ служат две плоские гармонические обмотки. Расположение обмоток в магнитной системе модели показано на рис. 2 и 4, а их параметры приведены в таблице 3. Радиальная протяженность этих обмоток и их положение относительно конечного рабочего радиуса определялись в основном требованиями к характеру зависимостей от радиуса амплитуды 4-ой гармоники и необходимой коррекции 8-ой гармоники.

Средние линии элементов периодичности этих обмоток изменяются по закону спирали Архимеда с одинаковыми параметрами: $a_4 = a_8 = 12$ см. При этом зависимость фазы максимума гармоник поля от радиуса близка к требуемой. Угловые протяженности между прямым и обратным витком элемента периодичности обмоток выбраны равными $\frac{\pi}{4}$ и $\frac{\pi}{8}$ соответственно. При таком выборе в разложениях полей в ряд Фурье присутствуют только нечетные гармоники относительно периода структуры этих обмоток. Это дает возможность изменять амплитуду 4-ой гармоники не изменяя основную. Азимутальное положение обмотки, формирующей 4-ую гармонику, выбиралось так, чтобы обеспечить на рабочем радиусе r_k оптимальный фазовый сдвиг $\beta_4 - \beta_8 = \frac{\pi}{2}$. Азимутальное положение корректирующей обмотки определялось из условия максимальной коррекции амплитуды основной гармоники и минимального искажения ее фазы.

Для окончательно выбранных параметров радиальная зависимость амплитуды и отклонения фазы 4-ой и 8-ой гармоник поля от идеальной фазы основной гармоники $\frac{1}{NA}$ представлены на рис. 7. Значения токов $I_4 = 55$ а и $I_8 = -17$ а находились на основе расчета частот Q_4 и Q_8 по формулам (5) и (6). Результаты расчета частот приведены на рис. 8. Кривые 1 и 3 характеризуют частоты свободных колебаний для случая, когда в структуре магнитного поля присутствует только основная гармоника. Радиальная зависимость вариации и отклонения фазы для этого варианта приведена на том же рисунке (кривые 6 и 9). При введении в структуру поля 4-ой гармоники и необходимой коррекции основной гармоники характеристики магнитного поля представлены кривыми 7, 8 и 10. В этом случае рассчитанные значения Q_4 и Q_8 изображены кривыми

2 и 4. Видно, что в зоне действия 4-ой гармоник частота аксиальных колебаний остается практически постоянной, а частота радиальных колебаний возрастает до резонансного значения $Q_2 = 2$ на конечном рабочем радиусе $r_k = 101,7$ см. Кривая 5 показывает характер Q_k при $\epsilon_4 = 0$ и ϵ_8 , соответствующей кривой 7. Во всех вышеприведенных случаях расчеты частот колебаний проводились в предположении изохронности среднего магнитного поля, зависимость которого от радиуса представлена кривой 1 на рис. 1.

При решении задачи формирования изохронного магнитного поля необходимо учесть среднее магнитное поле от всех гармонических обмоток, а также вертикальную составляющую магнитного поля земли^{x/}. Отметим, что при изменении одновременно знака тока и азимутального положения гармонических обмоток на полпериода их структуры амплитуды и фазы гармоник остаются неизменными, в то время как среднее поле меняет знак. Поэтому окончательное определение азимутального положения гармонических обмоток производилось при формировании среднего магнитного поля. Среднее магнитное поле, которое необходимо было сформировать с помощью 13 обмоток грубой коррекции при введении 4-ой гармоник и без нее показано на рис. 8 кривыми 3 и 2 соответственно. Эти остаточные поля соответствуют разности требуемого изохронного поля и среднего поля соответствующих гармонических обмоток и поля земли. Критерием выбора характера остаточного поля являлось условие близости к единице отношения $q = \frac{\sum_k |I_k|}{\sum_k I_k}$, где I_k — ток в k -обмотке грубой коррекции. При расчете магнитные поля обмоток аппроксимировались полями одиночных витков, проходящих в центре сечения катушки. Необходимые ампервитки обмоток для формирования поля в заданных допусках рассчитывались методом наименьших квадратов на ЭВМ. Распределение ампервитков (I_{W_2} и I_{W_1}) для двух рассматриваемых вариантов приведено в таблице 4. Величина q при этом равна 1,188 и 1,200 для 2 и 3 кривой остаточного поля соответственно. На этом же рисунке приведены (кривые 4 и 5) отклонения среднего поля от резонансного. Эти отклонения значительно меньше допуска, поэтому не могут вызвать заметного фазового сдвига частиц относительно в.ч. напряжения. Возможные ошибки в среднем поле ЭМРЦ, вызванные неточностями магнитной системы, могут быть скомпенсированы системой обмоток тонкой коррекции^{xx/}. Расположение этих катушек изображено на рис. 2, а их параметры указаны в таблице 5.

^{x/} В расчетах поле земли было принято равным 0,5 э.

^{xx/} Эти обмотки будут также использоваться для стабилизации топографии магнитного поля, либо для стабилизации фазы пролета ускоряющего электрода пучком.

З а к л ю ч е н и е

На основе расчетов, описанных в данной работе, определены параметры всех элементов магнитной системы, положенные в основу проектирования электронной модели релятивистского циклотрона.

Требуемая конфигурация магнитного поля формируется с помощью токовых систем (вариационные и аксиально-симметричные обмотки).

В работе предложен эффективный способ компенсации колебаний амплитуды и фазы вариации, обусловленных конечной радиальной протяженностью вариационной обмотки.

Магнитное поле ЭМРЦ сформировано для двух режимов работы ускорителя, определяемых значением частоты радиальных колебаний на конечном рабочем радиусе $Q_r = 1,8$ и $Q_r = 2,0$. Переход от первого режима ко второму осуществляется путем включения обмоток, создающих 4-ую гармонику, и незначительной коррекции магнитного поля первого режима.

Создание электронной модели позволит детально исследовать и определить эффективность предложенного резонансного метода вывода частиц из релятивистского циклотрона.

Действующая модель, кроме того, даст возможность экспериментально изучить нелинейные эффекты в РЦ, детально исследованные численными методами на ЭВМ.

Авторы выражают благодарность В.В. Кольге за помощь в проведении анализа результатов формирования поля.

Л и т е р а т у р а

1. В.П. Дмитриевский, В.В. Кольга, Н.И. Полумордвинова. Преприят ОИЯИ, Р-1981, Дубна, 1985.
 2. А.А. Глазов, Ю.Н. Денисов, В.П. Джелепов и др. Труды международной конференции по ускорителям, 1983, Дубна М., Атомиздат, 1984, стр. 547.
 3. В.В. Кольга. Диссертация, ЛЯП ОИЯИ, Дубна 1985.
 4. J. A. Martin, R. S. Livingston, J. E. Mann. Proc. Inter. Conf. on High Energy Accelerators, Brookhaven, 355, 1961.
- Б. В. П. Дмитриевский, Н. Л. Заплатин, В. С. Рыбалко, Л. А. Саркисян. Труды международной конференции по ускорителям, 1983, Дубна. М., Атомиздат, 1984, стр. 558.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 августа 1986 г.

Т а б л и ц а 2

Профиль вариационной обмотки

г (см)	h (см)	г (см)	h (см)	г (см)	h (см)	г (см)	h (см)	г (см)	h (см)	г (см)	h (см)
10	5,00	28	6,54	46	7,28	64	7,33	82	6,93	100	5,98
11	5,00	29	6,63	47	7,30	65	7,32	83	6,89	101	5,90
12	5,00	30	6,70	48	7,32	66	7,31	84	6,86	102	5,83
13	5,00	31	6,77	49	7,33	67	7,29	85	6,83	103	5,75
14	5,00	32	6,83	50	7,35	68	7,28	86	6,79	104	5,66
15	5,02	33	6,90	51	7,36	69	7,26	87	6,74	105	5,57
16	5,10	34	6,95	52	7,36	70	7,25	88	6,70	106	5,48
17	5,28	35	6,99	53	7,37	71	7,22	89	6,65	107	5,38
18	5,43	36	7,03	54	7,38	72	7,20	90	6,60	108	5,29
19	5,58	37	7,07	55	7,38	73	7,17	91	6,55	109	5,19
20	5,71	38	7,10	56	7,38	74	7,15	92	6,50	110	5,10
21	5,83	39	7,13	57	7,38	75	7,12	93	6,43	111	5,03
22	5,94	40	7,16	58	7,38	76	7,09	94	6,37	112	5,01
23	6,05	41	7,19	59	7,38	77	7,07	95	6,31	113	5,00
24	6,14	42	7,21	60	7,37	78	7,04	96	6,25	114	5,00
25	6,26	43	7,23	61	7,36	79	7,02	97	6,19		
26	6,36	44	7,25	62	7,35	80	6,99	98	6,12		
27	6,45	45	7,26	63	7,35	81	6,96	99	6,05		

Т а б л и ц а 3

Параметры гармонических обмоток

П а р а м е т р ы	З н а ч е н и я
1	2
<u>1 Вариационная обмотка</u>	
Периодичность N	8
Параметр спирали a_3	18,272 см
Угловая протяженность элемента периодичности α	22,5°
Начальный и конечный радиус ($R_H - R_K$)	(10,0 - 114,0) см

1	2
Минимальный и максимальный зазор $2h$	(10,0 - 14,76) см
Ток обмотки I_8	220 а
Фазовый сдвиг обмотки $N\theta_0$	0
<u>II Компенсационная обмотка</u>	
Периодичность N	8
Параметр спирали a_8	∞
Угловая протяженность элемента периодичности a	$22,5^\circ$
Начальный и конечный радиус ($R_H - R_k$)	(120,5 - 121,5) см
Минимальный и максимальный зазор $2h$	(35,0 - 64,0) см
Ток обмотки I_8	138 а
Фазовый сдвиг обмотки $N\theta_0$	1,9080
<u>III Обмотка для создания 4-ой гармоники</u>	
Периодичность N	4
Параметр спирали a_4	12,0 см
Угловая протяженность элемента периодичности a	45°
Начальный и конечный радиус ($R_H - R_k$)	(100,7 - 110,3) см
Зазор $2h$	14 см
Ток обмотки I_4	55 а
Фазовый сдвиг обмотки $N\theta_0$	0,0868
<u>IV Обмотка коррекции основной гармоники</u>	
Периодичность N	8
Параметр спирали a_8	12,0 см
Угловая протяженность элемента периодичности a	$22,5^\circ$
Начальный и конечный радиус ($R_H - R_k$)	(99,7 - 107,7) см
Зазор $2h$	16 см
Ток обмотки I_8	-17 а
Фазовый сдвиг обмотки $N\theta_0$	-0,9280

Т а б л и ц а 4

Параметры обмоток грубой коррекции

N	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
R (см)	10	12	25	35	45	55	65	75	85	95	105	111,5	116,2
h (см)	6,4	1275	1275	1275	1275	1275	1275	1275	1275	1275	1275	6,4	7,7
IW _{1(аб)} -80,8	67,3	9,4	10,3	12,4	15,7	19,9	26,3	34,9	54,0	91,5	0	606,8	
IW _{2(аб)} -82,6	67,4	9,4	10,5	12,6	16,3	20,3	28,1	35,5	78,0	1,9	23,2	602,7	
IW _{max(аб)}	350	250	50	50	50	50	50	100	100	150	250	150	700

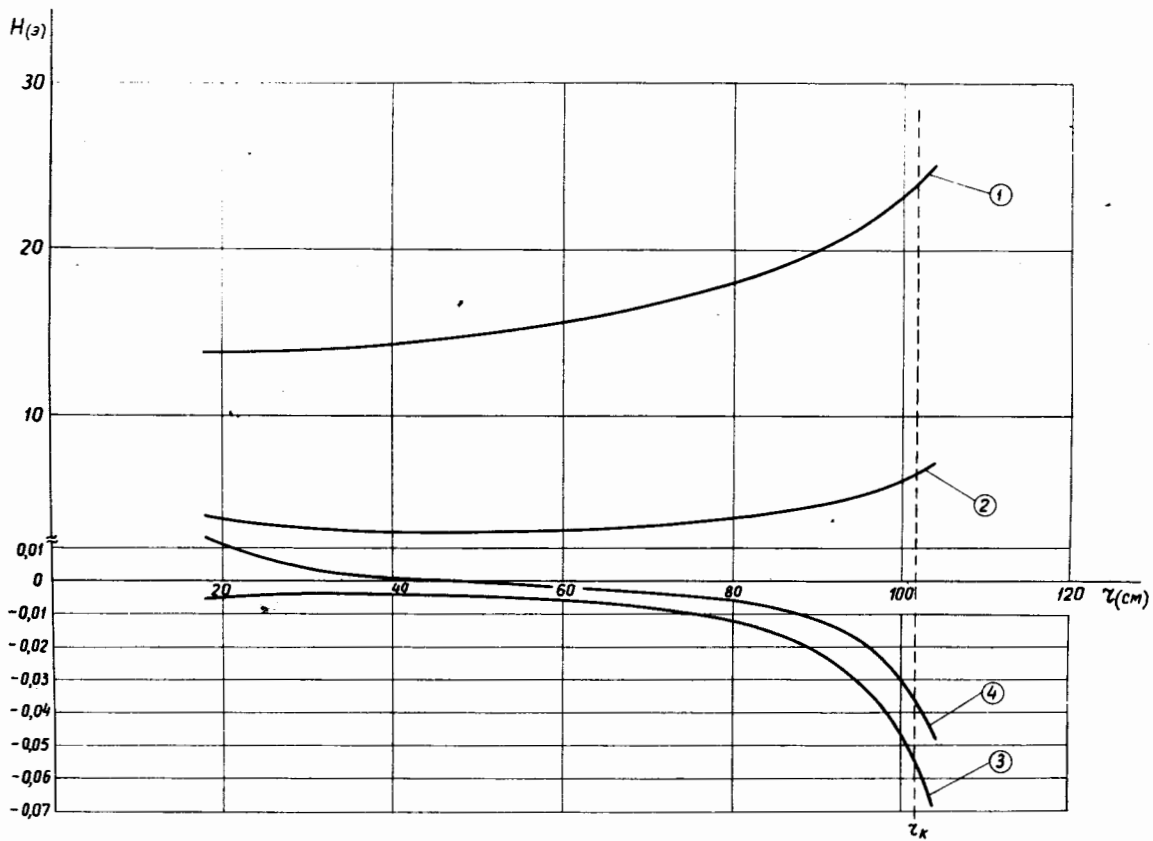
Т а б л и ц а 5

Параметры обмоток тонкой коррекции

N ⁰	I	2	3	4	5	6	7	8	9
R ₁ (см)	22,0	26,0	30,0	34,0	38,0	42,0	46,0	50,0	54,0
R ₂ (см)	24,0	28,0	32,0	36,0	40,0	44,0	48,0	52,0	56,0
h ₁ (см)	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
h ₂ (см)	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75
IW _{max(аб)}	50	50	50	50	50	50	50	50	50

N ⁰	10	11	12	13	14	15	16	17	18
R ₁ (см)	58,0	62,0	66,0	70,0	74,0	78,0	82,0	86,0	90,0
R ₂ (см)	60,0	64,0	68,0	72,0	76,0	80,0	84,0	88,0	92,0
h ₁ (см)	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
h ₂ (см)	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75
IW _{max(аб)}	50	50	50	50	50	50	50	50	50

N	19	20	21	22	23
R_1 (cm)	94,0	98,0	102,0	106,0	114,7
R_2 (cm)	96,0	100,0	104,0	108,0	116,1
h_1 (cm)	4,2	4,2	4,2	4,2	4,3
h_2 (cm)	4,75	4,75	4,75	4,75	6,8
IW_{max} (ab)	50	100	150	150	300



Р и с. 1. Зависимость изохронного среднего поля и требуемой вариации от радиуса.

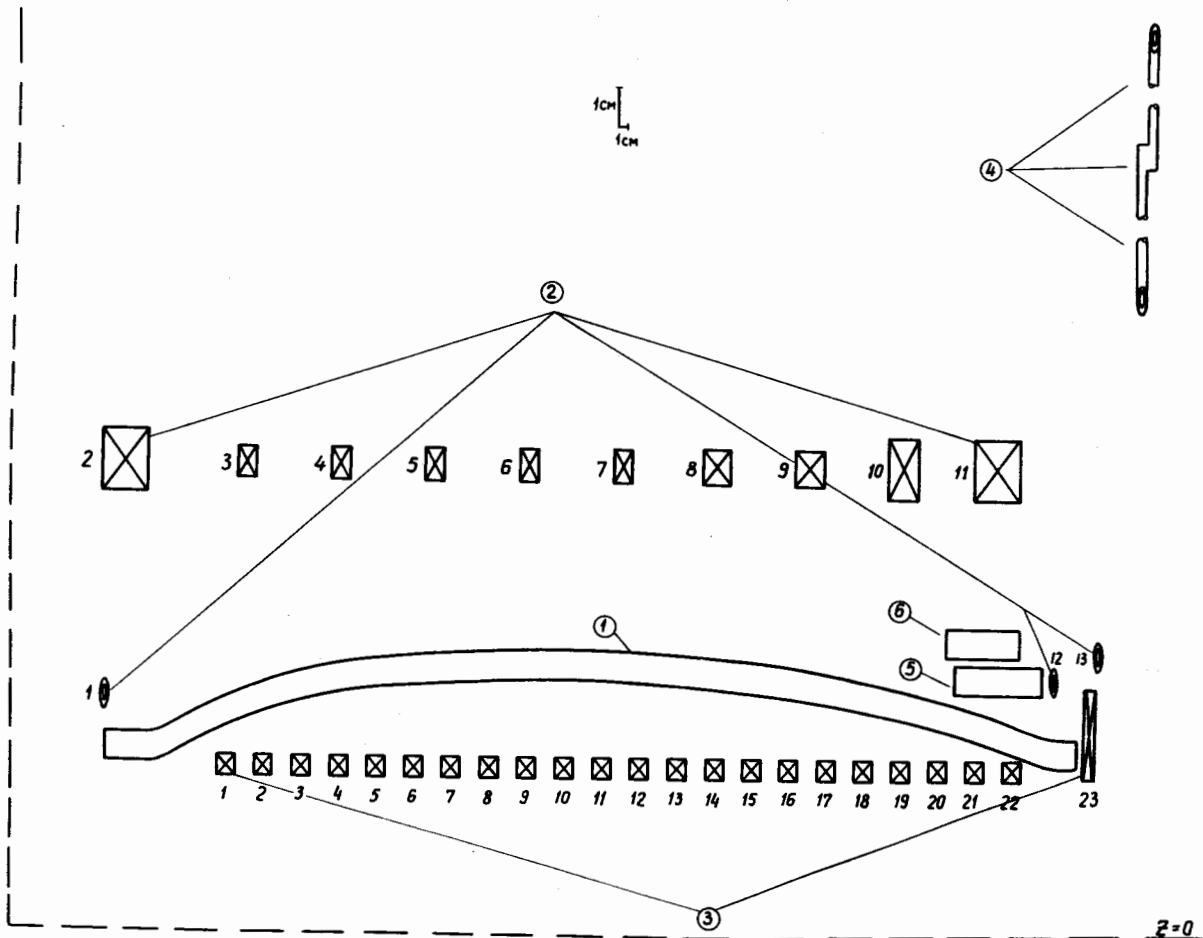


Рис. 2. Схема расположения токовых обмоток модели.

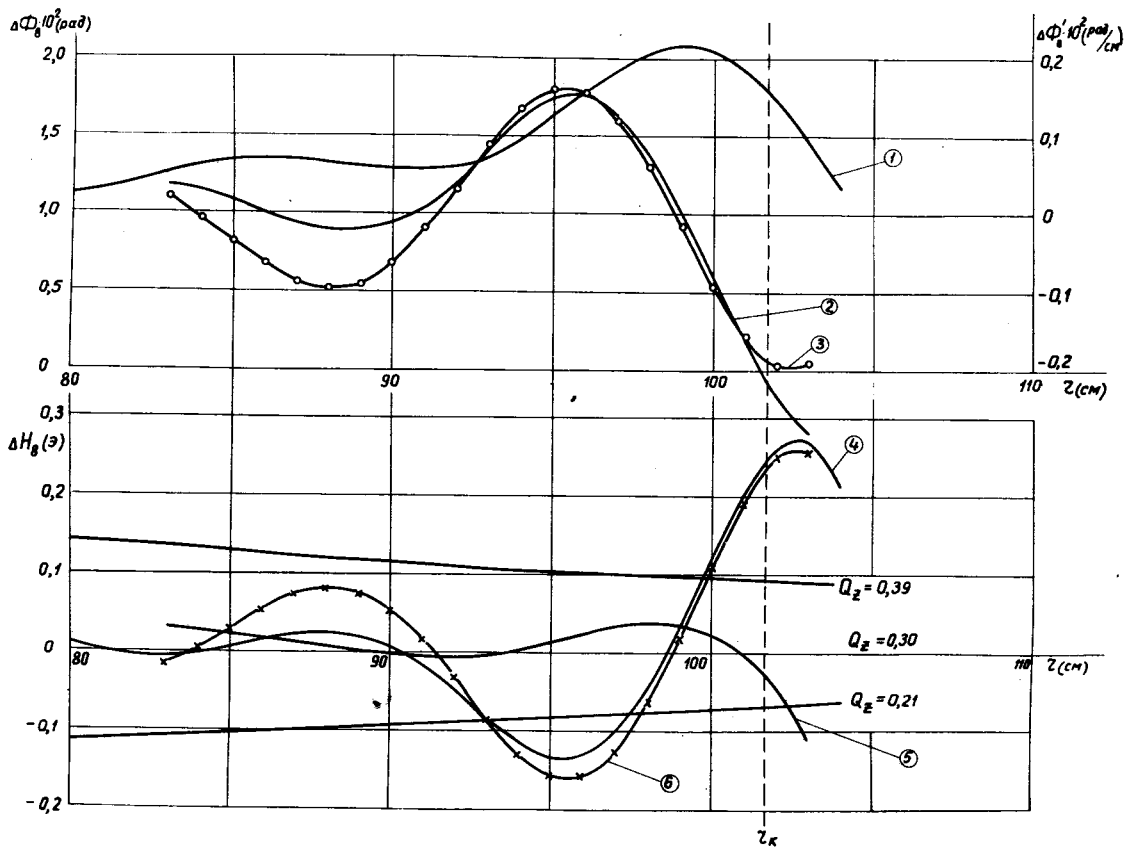


Рис. 3. Отклонения амплитуды и фазы 8-ой гармоники от требуемых значений.

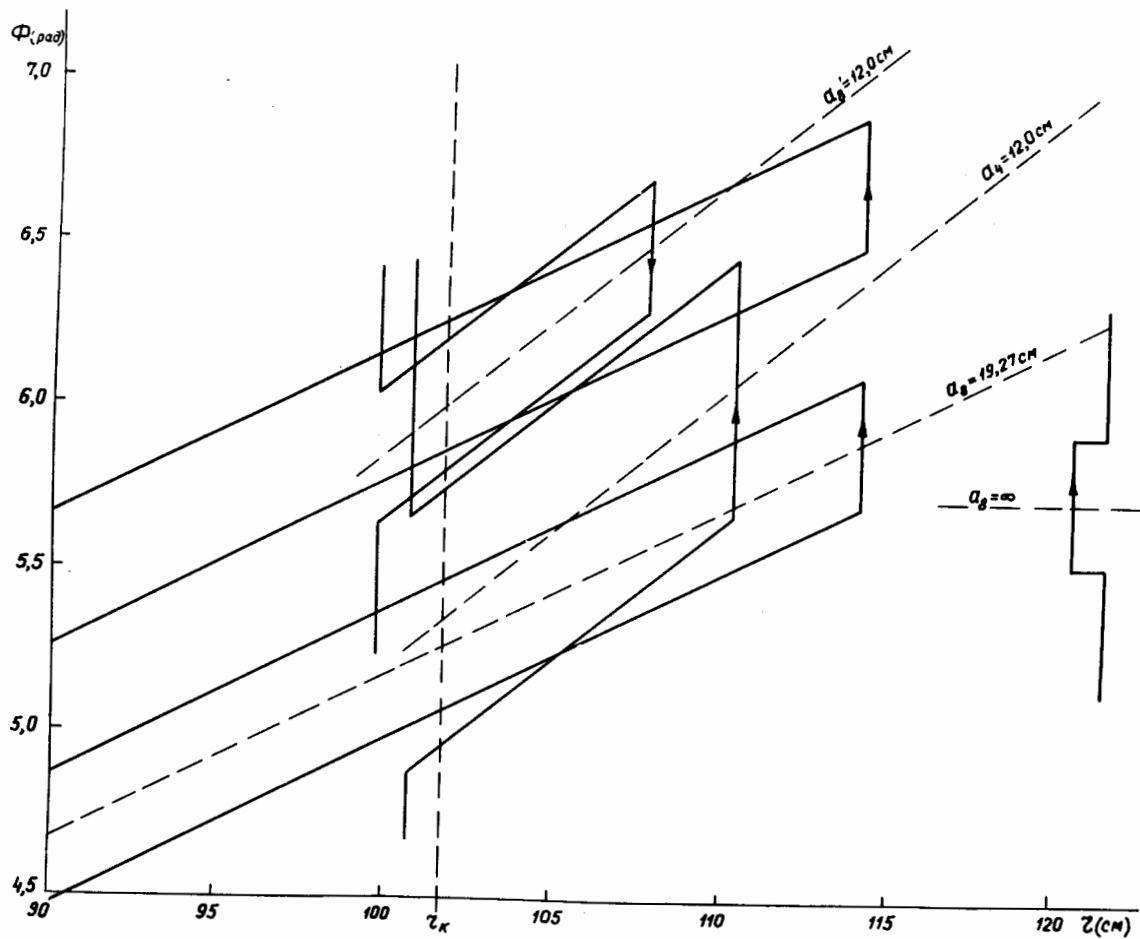


Рис. 4. Схема азимутального расположения и направления токов гармонических обмоток.

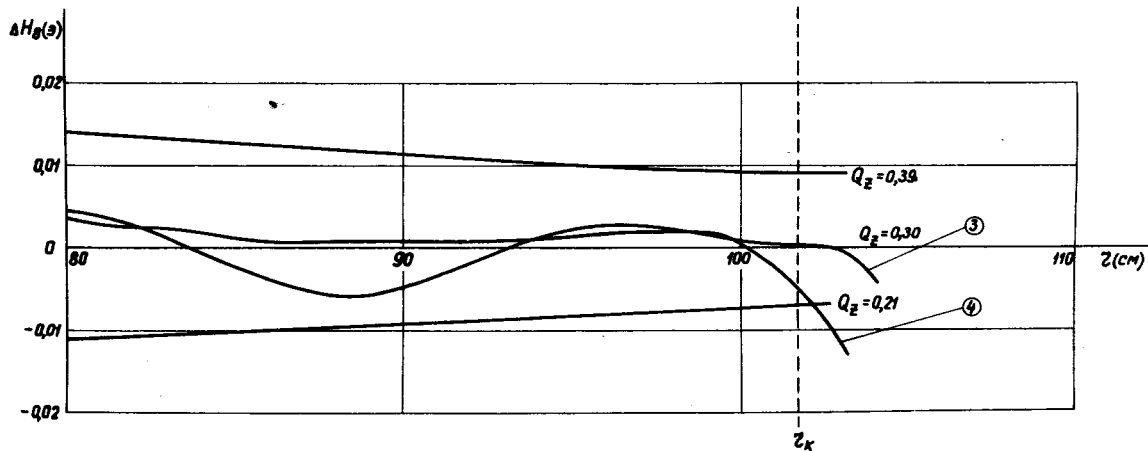
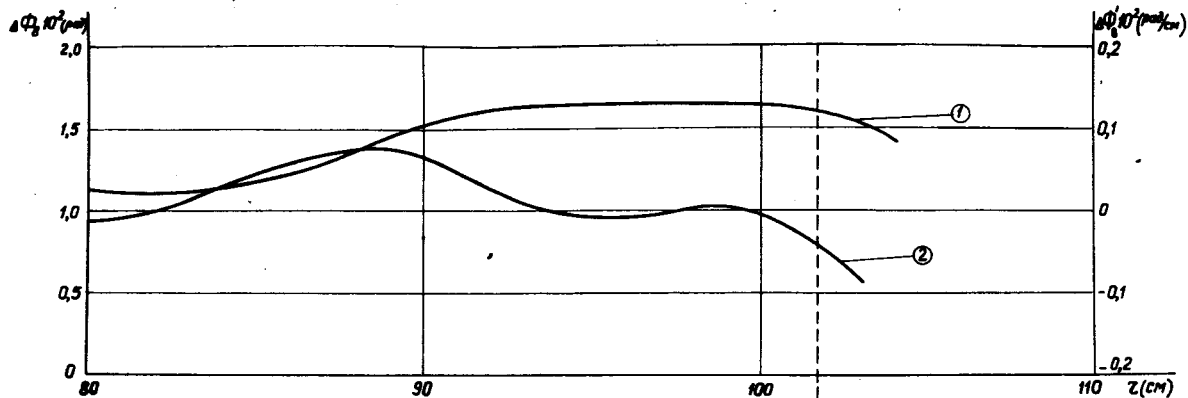


Рис. 5. Отклонения амплитуды, фазы и градиента отклонения фазы 8-ой гармоники от требуемых величин.

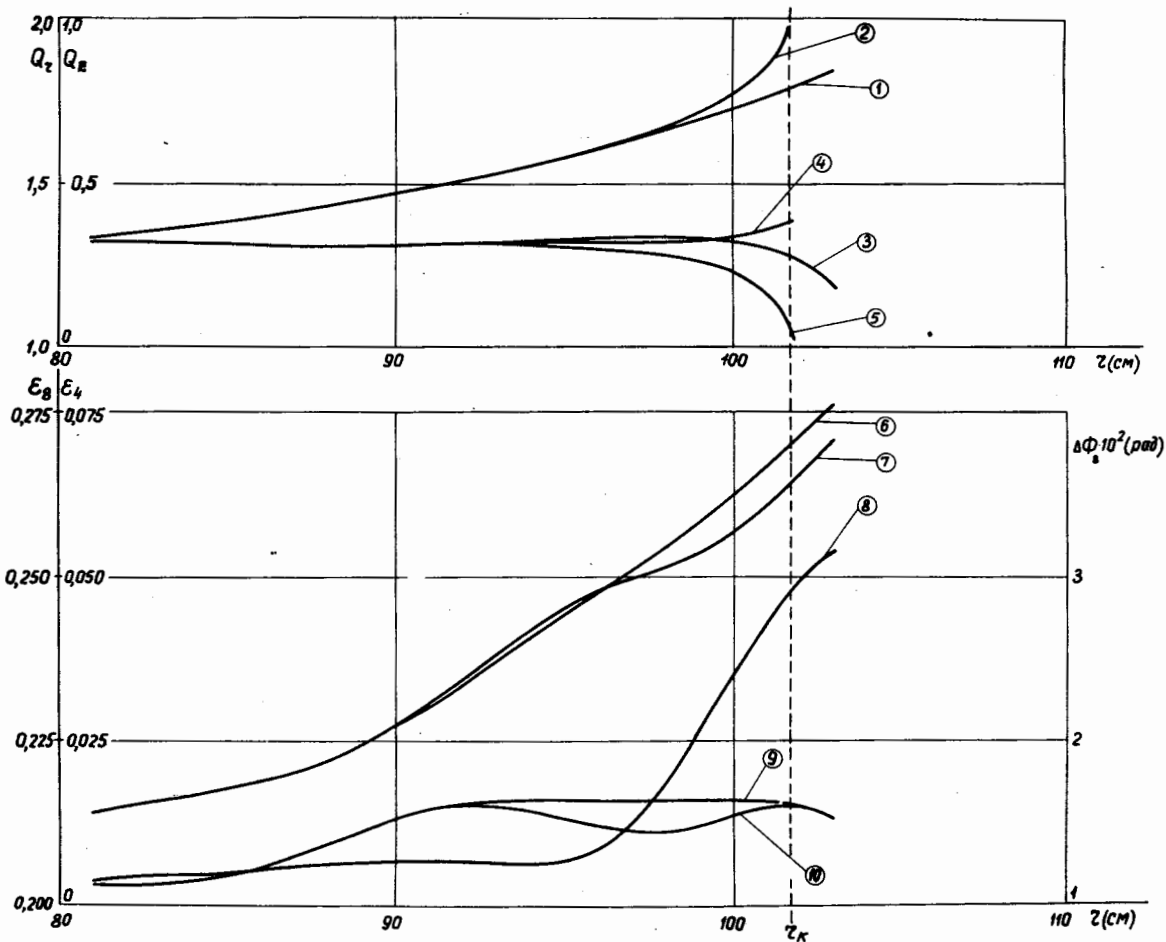


Рис. 6. Радиальная зависимость амплитуд и фаз гармоник и частот бетатронных колебаний.

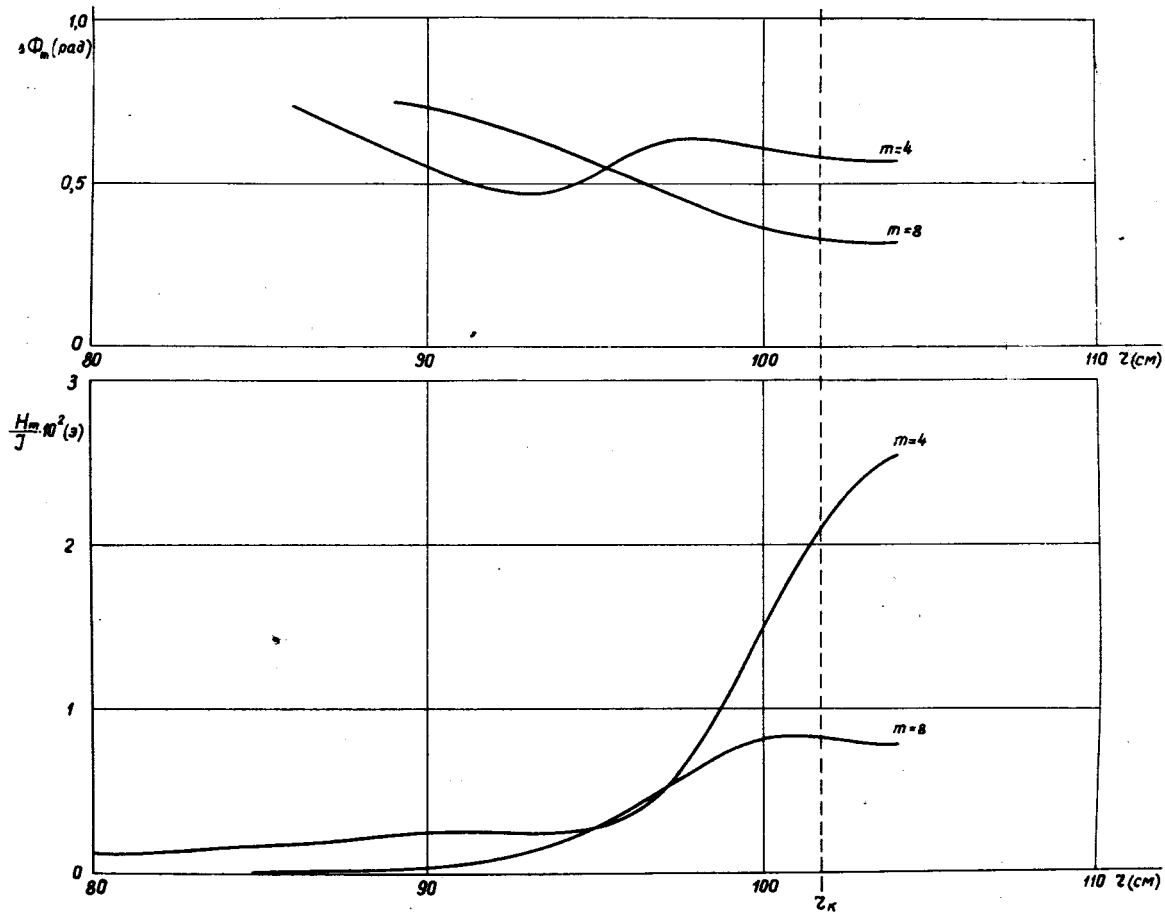


Рис. 7. Амплитуда и отклонение фазы гармоники для обмоток № 5 и 6 (рис. 2).

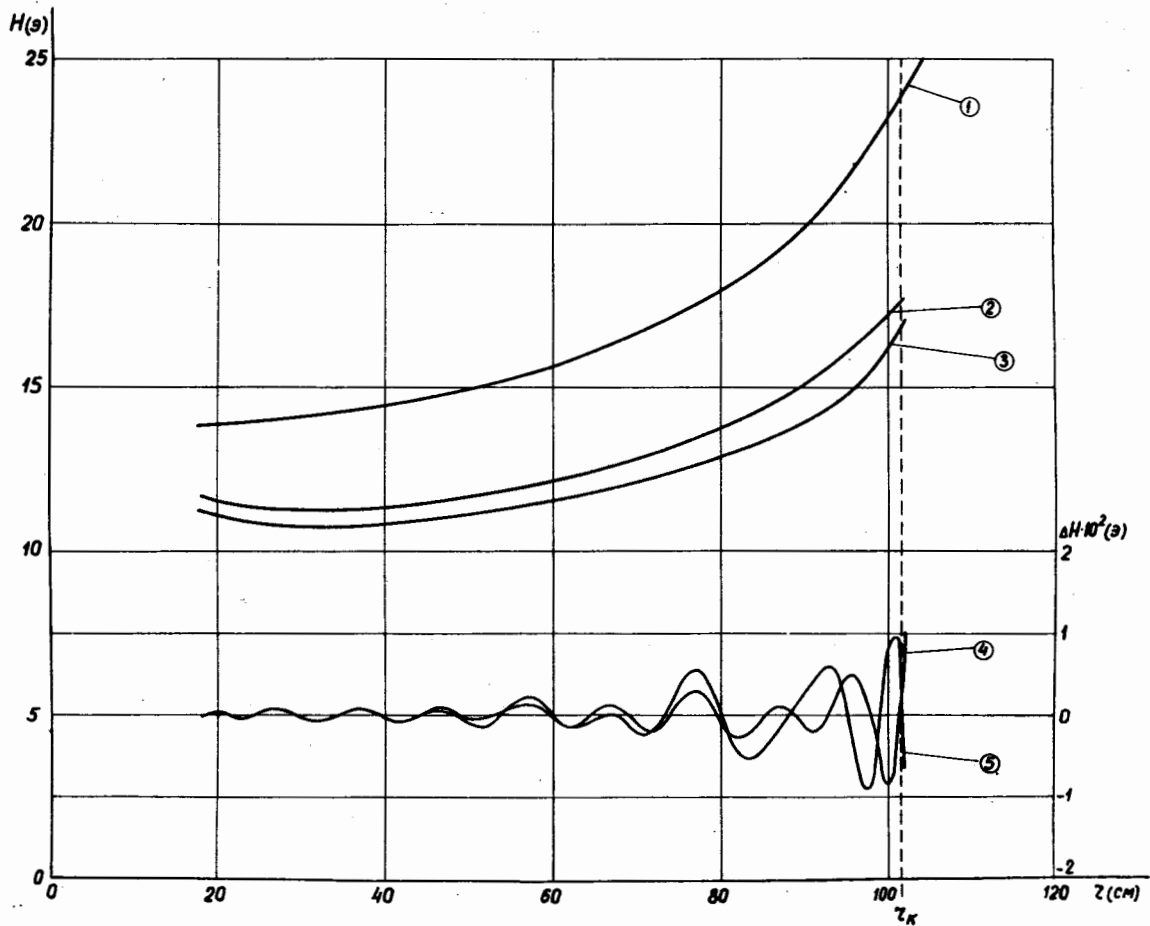


Рис. 8. Отклонение среднего магнитного поля от изохронного закона для двух режимов работы модели.