

С 375 И
А-484

19/IV-71

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1197/2-71

P 9-5590



Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ТОНКОЕ ШИММИРОВАНИЕ ПОЛЯ
НА МОДЕЛИ
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ФАЗОТРОНА
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ

1971

P 9-5590

Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин

ТОНКОЕ ШИММИРОВАНИЕ ПОЛЯ
НА МОДЕЛИ
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ФАЗОТРОНА
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Аленицкий Ю.Г., Ворожцов С.Б., Заплатин Н.Л.

P9-5590

Тонкое шиммирование поля на модели магнитной системы фазотрона с пространственной вариацией

Описаны результаты тонкого шиммирования магнитного поля фазотрона с пространственной вариацией. В условиях модели магнитной системы экспериментально достигнута точность формирования поля ± 20 э.

Сообщения Объединенного института ядерных исследований
Дубна, 1971

Alenitsky Yu.G., Vorozhtsov S.B., Zaplatin N.L.

P9-5590

Thin Field Shimmering by the Model of the Magnetic System for Phasotron with Space Variation

The results of thin shimmering of the magnetic field of the phasotron with space variation are described. Under conditions of the magnetic system model the accuracy of the field formation of ± 20 e was obtained.

Communications of the Joint Institute for Nuclear Research.
Dubna, 1971

Составление проектного задания на разработку магнитной системы реконструируемого синхроциклотрона ОИЯИ/1/ было связано с исследованием по модели магнитной системы/2/, параметры которой обсуждались в работе/3/. Точность изготовления модели магнитной системы и отличие размеров ярма и положения обмоток электромагнитов модели и натуре/4/ определяют предел точности формирования магнитного поля по модели.

Точность формирования поля, достигнутая при помощи основных элементов модели магнитной системы/2/, как будет ясно из дальнейшего, близка к предельной.

Для дальнейшего формирования поля ускорителя в структуре системы предусмотрены элементы тонкой коррекции поля: 4 токовые обмотки и секторные шиммы (рис. 1). В каждом из конструктивных пазов, располагаемых с интервалом $\Delta R = 1$ см (здесь и в дальнейшем размеры относятся к модели с коэффициентом подобия $k = 5,22$) вдоль поверхности, указанной на рисунке пунктирной линией, помещается до трех секторных шимм диаметром 0,2 см. Угловой размер секторных шимм определяется расстоянием между спиральными шиммами.

Секторные шиммы тонкой коррекции

Для оценки возможностей секторных шимм по коррекции среднего поля были проведены расчёты на ЭВМ, результаты которых показаны на рис. 2. Шиммирование экспериментальной кривой $\Delta H_{\text{экс.}}(\tau)$ производилось последовательно тремя слоями секторных шимм, начиная с ближайшего к медианной плоскости. Пунктиром изображена результирующая

кривая $\Delta H_{\text{экс.} + H_{\text{ш.}}}$, отклонение которой от требуемой во всей области формирования, кроме района $r = 0 + 2$ см, не превышает величины ± 10 э. Формирование поля для $r = 0 + 2$ см производилось другими элементами системы. Итерационный процесс расчёта необходимого набора шимм (на рисунке заштрихованы), заканчивался за ≈ 3 шага.

Этот метод шиммирования может быть использован и для определения профиля сплошного элемента магнитной системы, если его рассматривать как множество элементарных шимм, расположенных вплотную друг к другу. Однако при этом необходимо потребовать, чтобы оптимальный набор элементарных шимм образовывал односвязную область.

Эксперименты на модели 1 : 5,22 с применением секторных шимм (рис. 3) показали, что такие шиммы позволяют компенсировать значительные возмущения среднего поля (≈ 80 э). Однако из-за неизбежных различий между расчётными и экспериментальными полями секторных шимм потребуется 2-3 этапа расчётов и экспериментов для достижения необходимой точности формирования поля.

К недостаткам этого метода следует отнести заметное (≈ 120 э) снижение амплитуды вариации поля в области максимальной произведённой коррекции среднего поля, что приводит к снижению частоты свободных аксиальных колебаний. Из рис. 4 видно, что величина корректируемого возмущения $\Delta H \approx 100$ э является предельной при таком методе шиммирования среднего поля.

Токовые обмотки

Для оценки магнитного поля, создаваемого токовой обмоткой, находящейся в структуре системы, приведенной на рис. 6, было проведено измерение поля при $JW = 1620$ ав. На этом же рисунке представлена расчётная кривая для поля одиночного токового витка, располагаемого в центре обмотки. Имея в виду точность совпадения экспериментальной и расчётной зависимостей, мы провели расчётное шиммирование (в трех вариантах) возмущений

а) среднего поля ΔH_T ,

б) градиента среднего поля $(\Delta H_T)_T$ со статистическим весом

$$\omega = \left(\frac{dH_T}{dr} \Big|_{r=22 \text{ см.}} \right) / \left(\frac{dH_T}{dr} \right),$$

где H_T — требуемая зависимость среднего поля.

Результаты расчётов представлены на рис. 6 кривыми 1,2,3 соответственно и в табл. 1. Как видно из рисунка, обмотки в отличие от секторных шимм практически не оказывают влияния на градиент среднего поля, а лишь изменяют в небольших пределах уровень поля.

В таблице приведены величины расчётных ампер-витков обмоток и значения соответствующих плотностей тока для натуральных размеров системы при коэффициенте заполнения $k_{\text{зап.}} = 0,5$. За исключением 2-го варианта, требуемые плотности тока слишком велики при контактном способе охлаждения обмоток.

Различие расчётных и экспериментальных полей приводит к необходимости формирования поля в несколько этапов "расчёт-измерение".

Центральная область

В центре системы для $r = 0 + 2$ см создание необходимого среднего магнитного поля с допусками $0 \text{ э} \leq \Delta H \leq 8 \text{ э}$ осложняется наличием отверстия диаметром $\phi = 1$ см для аксиальной инжекции заряженных частиц. Искажение поля, вносимое этим отверстием, имеет градиент $\approx 70 \text{ э/см}$ (рис. 7а, кривая 1). Для устранения описанного эффекта экспериментально исследовались различные конфигурации центральной кольцевой шиммы и выреза со стороны $h_1(r)$ спиральных шимм^{1/5/} (рис. 7а,б). Эти исследования показали, что конусность кольцевой шиммы в сторону медианной плоскости уменьшает градиент и уровень среднего поля для $r = 0 + 0,8$ см. Изменение ширины четырех вертикальных вырезов в кольцевой шимме со стороны медианной плоскости приводит к соответствующему изменению уровня поля в указанной области. Увеличения градиента для $r = 1,0 + 2,0$ см можно достигнуть за счёт уменьшения радиального размера выреза в спиральных шиммах. Имея в виду обнаруженные тенденции изменения характеристик среднего поля при

ТАБЛИЦА

тип расчета		Катушки				$\sum_{i=1}^4 JW _i$	$\frac{\sum_{i=1}^4 JW _i}{\min \sum_{i=1}^4 JW _i}$
		1	2	3	4		
компенсац. ΔH_T	$JW(ac)$	-2162	5570	-7262	4866	19860	7.51
	$j(\frac{Q}{S_{с.в.д.}}) M1:1$	0.52	6.84	12.37	7.97		
компенсац. $\Delta H_T/2$	$JW(ac)$	-725	968	105	-847	2645	1.00
	$j(\frac{Q}{S_{с.в.д.}}) M1:1$	0.17	1.19	0.18	1.39		
компенсац. $\omega(\Delta H_T/2)$	$JW(ac)$	936	-1756	2643	-1936	7271	2.75
	$j(\frac{Q}{S_{с.в.д.}}) M1:1$	0.225	2.16	4.50	3.17		
S сечения в mm^2 / масштаб 1:5,22		1593	312	225	234		

$$j_i (M1:1) = \frac{JW_i}{K_{защ.} \cdot S_i \cdot K_{нож}} \quad , \quad \text{где} \quad K_{защ} = 0,5, \quad K_{нож} = 5,22.$$

соответствующих изменениях геометрии центра системы, удалось сформировать на модели системы в области $r = 0 + 2$ см среднее поле с амплитудой возмущения не выше 10 э. Для этого была выбрана кольцевая шимма с конусностью в сторону медианной плоскости и с 4 вертикальными разрезами до половины высоты шиммы (рис. 7б). Дальнейшее уменьшение возмущения поля в экспериментах на модели 1 : 5,22 невозможно из-за неточностей изготовления кольцевой центральной шиммы.

Амплитуды основной и низших гармоник поля, а также частота Q_z в сравнении с требуемой кривой приведены на рис. 8. Из этих более подробных данных, полученных при измерениях поля с интервалом $\Delta r = 0,25$ см, видно, что начало требуемой параметрической фокусировки имеет место при $r_H = 2,4$ см. Величина амплитуды третьей гармоники, представленной на рис. 8, необычайно велика для структуры системы с $N = 4$. Объяснение этого заключается, по-видимому, в несовпадении магнитного центра системы и центра системы измерения. Представим магнитное поле в медианной плоскости центральной области в виде

$$H(r, \phi) = a_0 r^2 + \sum_{k=1}^N r^k [a_k \cos(k\phi) + b_k \sin(k\phi)]. \quad (1)$$

После замены координат $x' = x + c$ в (1) получим следующее изменение среднего поля и низших гармоник при измерении в штрихованной системе координат:

$$\overline{\Delta H} = a_0 c^2 + a_1 c + a_2 c^2 + a_3 c^3 + a_4 c^4,$$

$$\begin{aligned} \Delta H^{(1)} = 2cr [a_0 + a_2 + \frac{3}{2} a_3 c + 2a_4 c^2] \cos \phi + \\ + 2cr [b_2 + \frac{3}{2} b_3 c + 2b_4 c^2] \sin \phi, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Delta H^{(2)} = 3cr^2 [a_3 + 2ca_4] \cos 2\phi + 3cr^2 [b_3 + 2cb_4] \sin 2\phi$$

$$\Delta H^{(3)} = 4cr^3 [a_4] \cos 3\phi + 4cr^3 [b_4] \sin 3\phi.$$

Предполагая, что амплитуда третьей гармоники H_3 , измеренная в старой системе координат, значительно меньше ее изменения ΔH_3 при переходе в штрихованную систему, получим в новой системе

$$H_3 = \frac{4c}{r} H_4. \quad (3)$$

Основываясь на данных рис. 8 и (3), можно заключить, что смещение центров при измерениях составляло величину $c \approx 0,25$ мм. Изменение величин остальных гармоник определяется в основном членом, содержащим H_4 :

$$\overline{\Delta H} \approx a_4 c^4, \Delta H_1 \approx 4 H_4 c^3 r, \Delta H_2 \approx 6 H_4 c^2 r^2, \quad (4)$$

и составляет незначительную величину ввиду малости высшего порядка по c .

Как указывается в работе/6/, определение истинного положения магнитного центра системы возможно производить по амплитуде и фазе $N-1$ гармоники измеренного поля.

Предел моделирования

Неточности изготовления и установки элементов модели магнитной системы и погрешности системы измерения поля определяют ту точность формирования поля с помощью основных элементов, при которой еще существует соответствие результатов измерения поля на модели и натуре. Сделаем оценку предельной точности формирования для модели магнитной системы установки "Ф", относительно которой известно следующее:

- 1) спиральные шиммы изготовлены на универсально-фрезерном станке с копировальным приспособлением, шаблон спиральных шимм размечен и выполнен с точностью $\pm 0,1$ мм;
- 2) точность выполнения заданной формы границ спиральных шимм равна $\pm(0,2 + 0,3)$ мм;

3) точность изготовления спиральных и кольцевых шимм по параметру h имеет величину $\pm (0,1 + 0,15)$ мм;

4) радиальная протяженность кольцевых шимм выполнена с точностью $\pm 0,3$ мм.

Возмущения среднего магнитного поля, связанные с геометрическими ошибками элементов системы, составляют: $\Delta H = 30 + 40$ э. Это означает, что экспериментально полученная с помощью основных элементов системы точность формирования поля на модели близка к предельно возможной.

Программы вычислений на ЭВМ

Для определения оптимальных ампервитков токовых обмоток тонкого шиммирования была написана программа GRADI на FORTRAN-63 для ЭВМ CDC-1604A^{/7/}. Программа использует стандартную подпрограмму FUMILI минимизации квадратичного функционала из библиотеки программ CDC-1604A^{/8/}. Исходными данными для программы являются величина отклонения среднего поля ΔH от требуемого, число обмоток и их расположение. Выбор ампервитков обмоток J осуществляется в соответствии с условием минимизации величины

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \omega_i^2 (y_i^T - y_i)^2, \quad (5)$$

где N - число точек наблюдения поля, $y_i^T =$ либо ΔH , либо $\frac{d}{dr}(\Delta H)$ на радиусе r_i ,

$$y_i = \sum_{j=1}^M x_j^i J_j, \quad (6)$$

где M - число пар обмоток, определяемое исходными данными. Если $y_i^T = \Delta H$, то

$$x_j^i = \frac{0,4}{\sqrt{z_j^i}} \left[K\left(\frac{\pi}{2}, k_j^i\right) + \frac{R_j^2 - r_i^2 - h_j^2}{(R_j - r_i)^2 + h_j^2} \cdot E\left(\frac{\pi}{2}, k_j^i\right) \right], \quad (7)$$

где

$$k_j^1 = 2\sqrt{\frac{R_j r_1}{z_j^1}}, \quad z_j^1 = h_j^2 + (r_1 + R_j)^2,$$

R_j, h_j - радиус и расстояние до медианной плоскости середины j -той обмотки.

В этом случае x_j^1 равно полю кругового витка, деленному на величину протекающего по нему тока $\frac{H}{J}$.

Если $y_1^T = \frac{d}{dr}(\Delta H)$, то

$$x_j^1 = H \frac{r_1 + R_j}{z_j^1} + \frac{0,8 R_j}{\sqrt{z_j^1}} \left\{ E\left(\frac{\pi}{2}, k_j^1\right) \frac{(R_j - r_1)^2 - h_j^2}{[(R_j - r_1)^2 + h_j^2]^2} - \right. \\ \left. - \frac{r}{(z_j^1)^2} (R_j^2 - r_1^2 + h_j^2) [K'_j(t_j^1) \frac{R_j^2 - r_1^2 - h_j^2}{(R_j - r_1)^2 + h_j^2}] \right\}, \quad (8)$$

где $t_j^1 = 1 - (k_j^1)^2$; K'_j и E'_j определяются из выражений /10/:

$$K'_j = (0,085 129086 t + 0,048970299) \cdot t - 0,026817849 - \frac{0,5}{t} - \\ - [(0,032834736 \cdot t + 0,120237038) \cdot t + 0,12475074] \cdot \ln(t),$$

$$E'_j = (0,108885292 \cdot t + 0,088696146) \cdot t + 0,19509409 - \\ - [(0,04148997 \cdot t + 0,16300448) \cdot t + 0,24969795] \cdot \ln(t).$$

Здесь x_j^1 равно градиенту по радиусу поля кругового витка, деленному на величину тока витка.

Задавая больший статистический вес ω_1 на радиусе r_1 , чем в других точках, можно выделять особую значимость этого радиуса по сравнению с другими.

Оптимальный набор шимм тонкой коррекции для компенсации заданного отклонения среднего поля ΔH от требуемого значения подбирается

с помощью программы 111. Эта программа является модификацией программы 11, описанной в работе/2/. В программе определяется величина

$$F = \sum_{i=1}^N |\Delta H_i + \sum_{j=1}^M x_j \delta_j|, \quad (10)$$

где M - число секторных шимм, N - число радиусов наблюдения, x_j^i - расчётное значение для j -той шиммы на радиусе r_i , δ_j равно либо 1, либо 0 в зависимости от того, участвует поле j -итой шиммы в расчёте или нет.

Задача состоит в определении набора δ_j , $j = 1, 2, \dots, M$, такого, чтобы величина F была минимальной. Вычисление происходит по следующему алгоритму:

- 1) изменение δ_j по сравнению с предыдущим значением для $j = 1, 2, \dots, N$, $1, 2, \dots, N$, и т.д.;
- 2) вычисление F при новом значении каждого δ_j ;
- 3) в случае, если F уменьшается при новом значении δ_j , то δ_j приобретает измененное значение в последующих расчётах.

Вычисления продолжаютс я до тех пор, пока величина F еще уменьшается с изменением δ_j .

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность доктору Х.У. Гершу за предложение эффективного алгоритма расчёта распределения секторных шимм.

Л и т е р а т у р а

1. А.А. Глазов и др. Препринт ОИЯИ, 9-39-51, Дубна, 1968.
2. Ю.Г. Аленицкий, С.Б. Ворожцов, Н.Л. Заплатин, Л.К. Лыткин. Сообщение ОИЯИ, Р9-5246, Дубна, 1970.
3. С.Б. Ворожцов, Н.И. Дьяков, Н.Л. Заплатин. Сообщение ОИЯИ, 9-4517, Дубна, 1969.
4. С.Б. Ворожцов, Л.Т. Закамская, Н.Л. Заплатин. Сообщение ОИЯИ, Р9-5013, Дубна, 1970.

5. D.H. Trew. NIRL/M/ 71 (1964).
6. R.G. Allas, et al., Nucl.Inst. and Meths., 64, 333-345 (1968).
7. С.Б. Ворожцов и др. Препринт ОИЯИ, Р-1738, Дубна, 1964.
8. Библиотека стандартных программ на ФОРТРАНе для СДГ-1604А, ОИЯИ, Дубна, 1969.
9. М.И. Агеев и др. Алгоритмы (51. + 100), вып. 3, ВЦ АН СССР, М., 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел
1 февраля 1971 года.

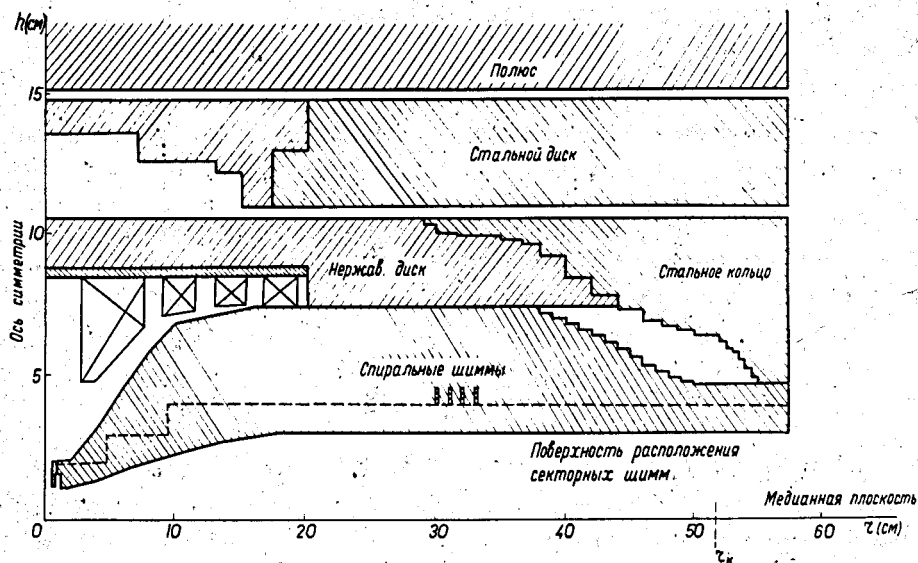


Рис. 1. Конструктивная схема магнитной системы.

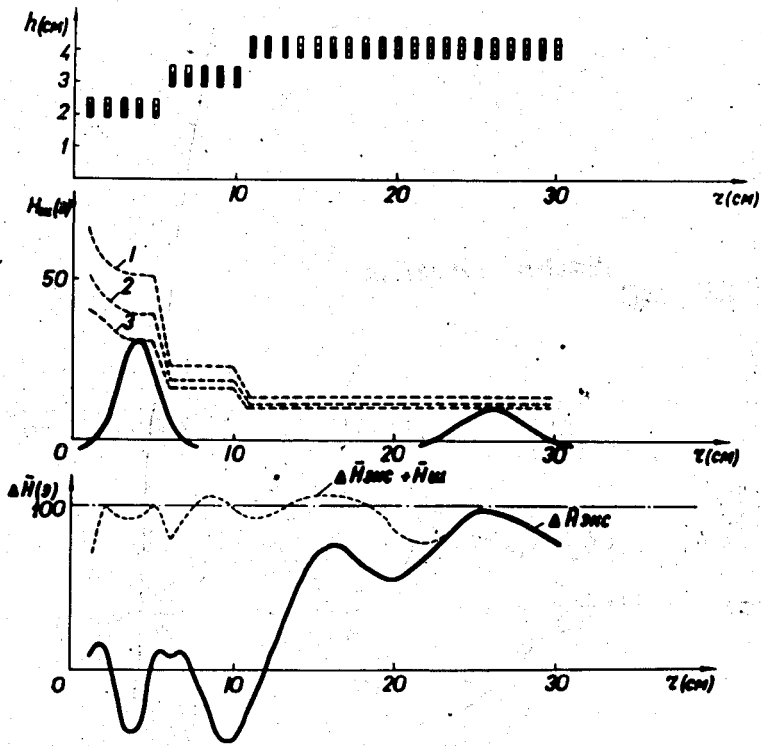


Рис. 2. Расчётное шиммирование среднего поля с помощью секторных шимм.

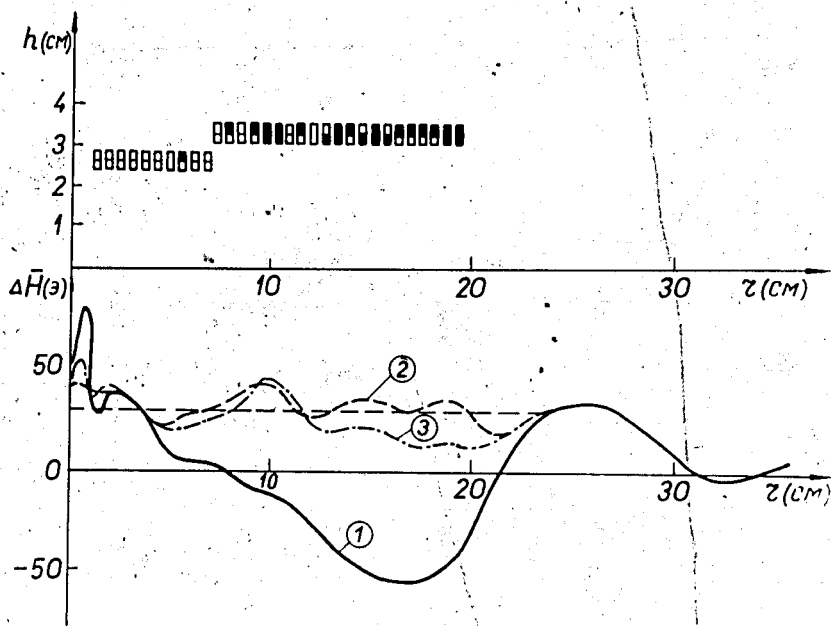


Рис. 3. Экспериментальное шиммирование секторными шиммами. 1 - до шиммирования; 2 - расчётное шиммирование; 3 - экспериментальный результат.

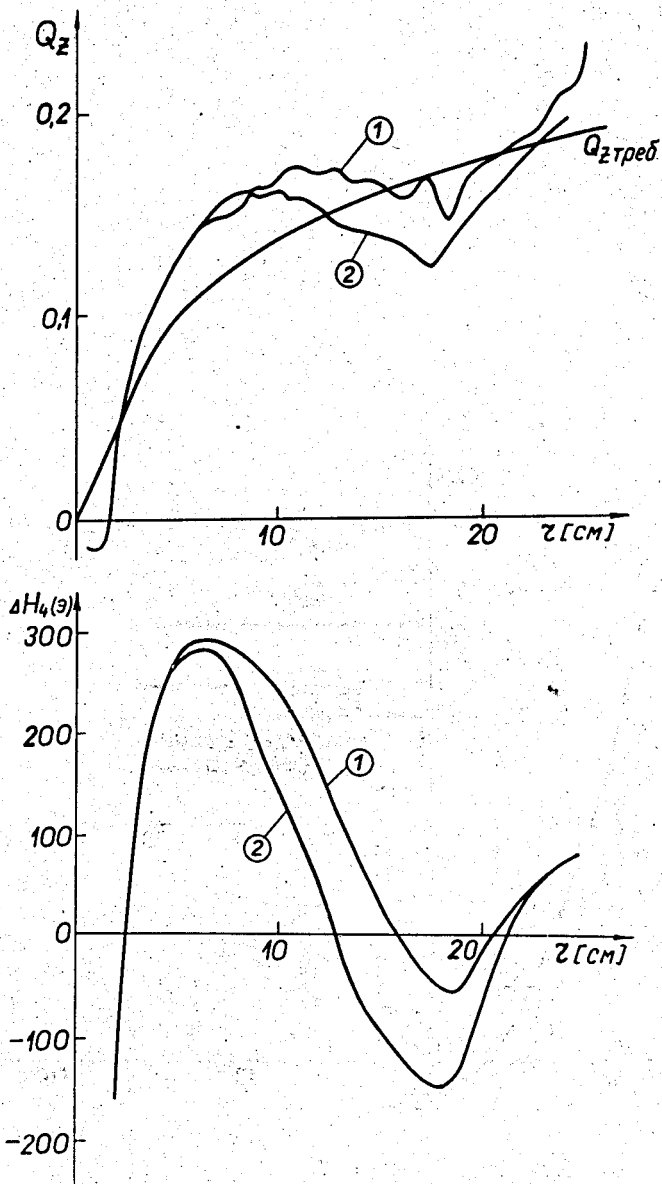


Рис. 4. Влияние секторных шимм на вариацию магнитного поля: 1 - до шиммирования, 2 - после шиммирования.

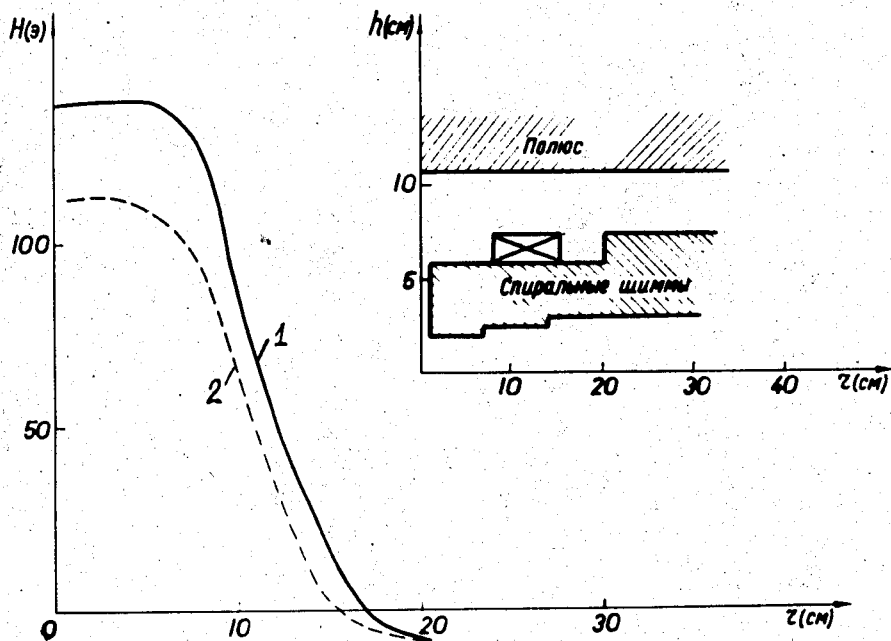


Рис. 5. Сравнение экспериментального и расчётного полей обмоток с током. 1 - эксперимент, $JW = 1620$ ам; 2 - расчёт.

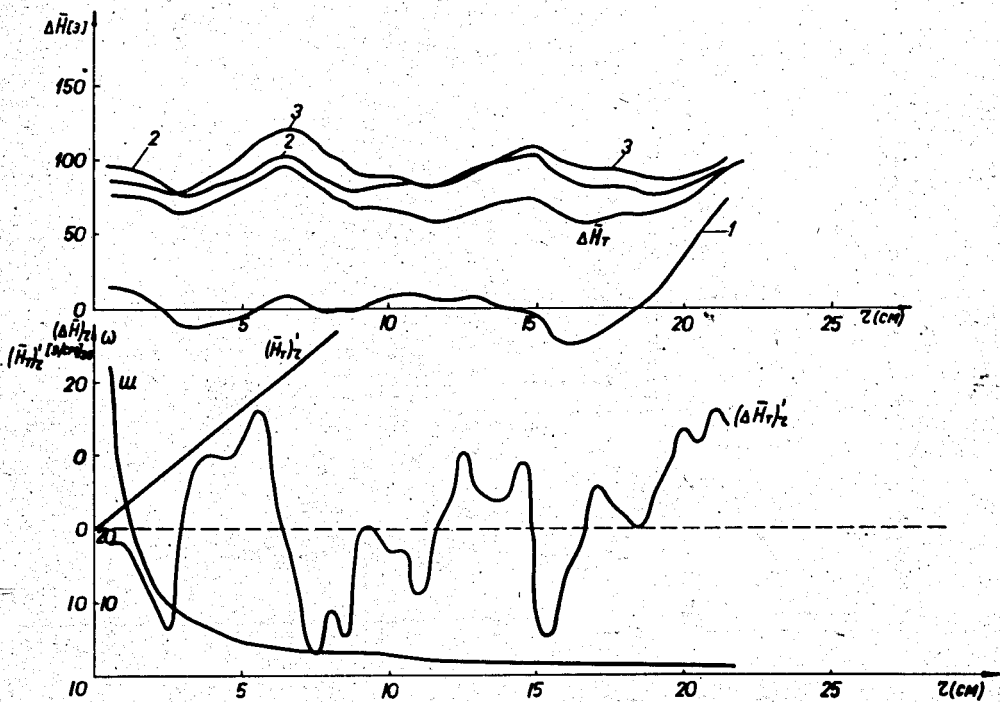


Рис. 6. Результаты расчётного шиммирования поля с помощью обмоток с током.

a)

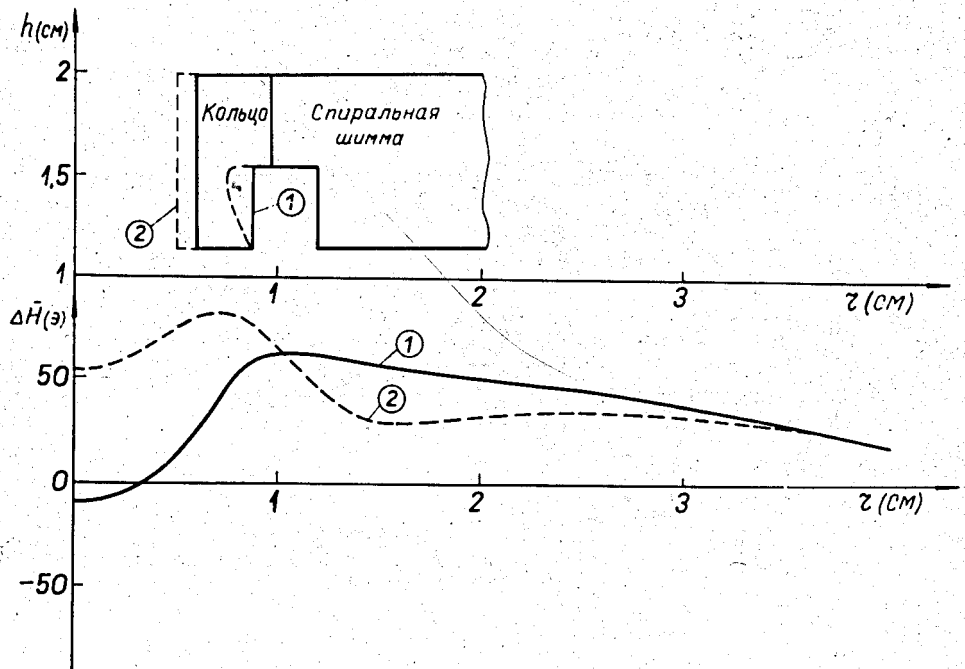
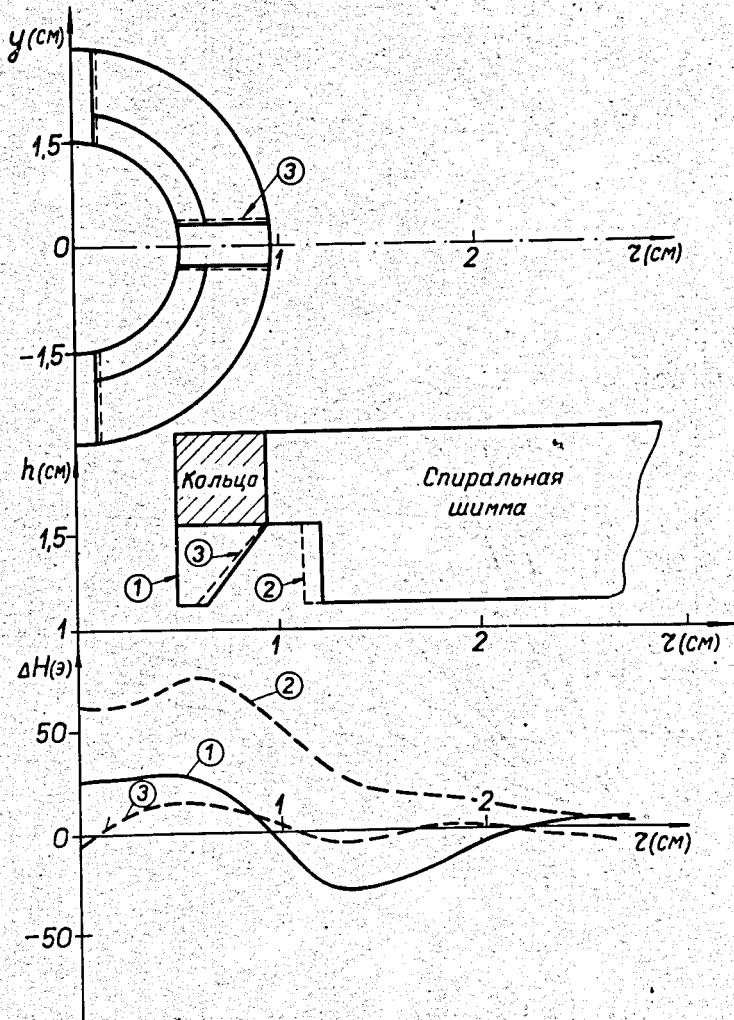


Рис. 7. Формирование поля в центральной области.

б)



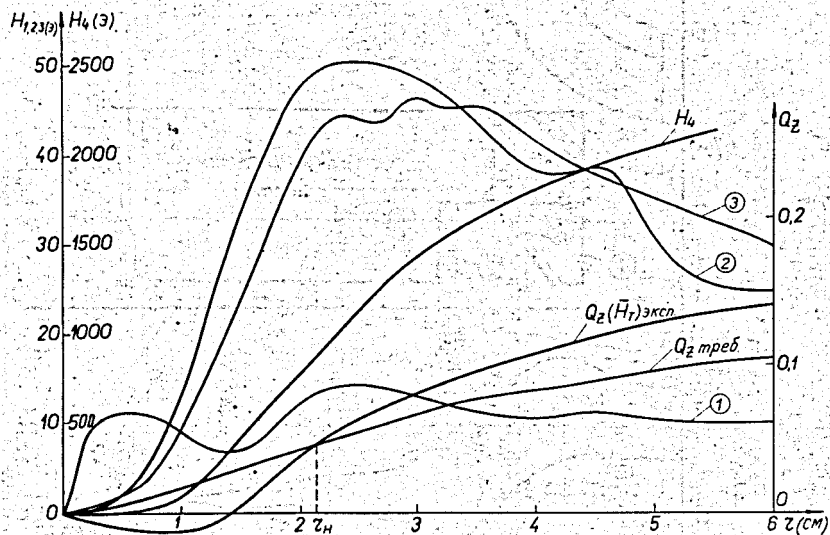


Рис. 8. Характеристики поля модели в центральной области.