

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

1964/83

18/4-83

P9-82-925

Н.Л.Заплатин, С.А.Ивашкевич,
Н.А.Морозов, П.Т.Шишлянников

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ
МЕДИАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ФАЗОТРОНА ОИЯИ

1982

Неточности изготовления элементов магнитной системы сильно-точного фазотрона ОИЯИ /установки "Ф"/ и разброс магнитных характеристик материала приводят к искажениям медианной поверхности магнитного поля^{/1/} и вызывают появление в средней плоскости зазора ускорительной камеры радиальной и азимутальной компонент магнитного поля, которые могут быть представлены в следующем виде:

$$B_r(r, \phi) = \bar{B}_r + \sum_{k=1}^{\infty} B_{rk} \cos k(\phi - \phi_{rk}), \quad /1/$$

$$B_{\phi}(r, \phi) = \sum_{k=1}^{\infty} B_{\phi k} \cos k(\phi - \phi_k).$$

Наибольшую опасность представляет радиальная компонента поля, которая вызывает появление вынужденных вертикальных колебаний ускоряемых частиц. Постоянная составляющая и гармоники этих колебаний записываются как

$$\bar{z} = \frac{r}{\bar{B}_z Q_z^2} \left\{ \bar{B}_r + \frac{B_{zN} B_{rN}}{\bar{B}_z [N^2 - (1+n)]} \right\}, \quad /2/$$

$$z_k = \frac{r B_{rk}}{\bar{B}_z (Q_z^2 - k^2)}, \quad /3/$$

где \bar{B}_z , B_{zN} - средняя составляющая и основная гармоника вертикальной компоненты магнитного поля; $n = \frac{r}{\bar{B}_z} \frac{d\bar{B}_z}{dr}$; Q_z - частота свободных вертикальных колебаний частиц.

Эти соображения потребовали включения в программу измерений магнитного поля установки "Ф" определения горизонтальных компонент магнитного поля.

1. ИЗМЕРЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ СРЕДНЕЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ РАДИАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ (\bar{B}_r)

Допустимое значение \bar{B}_r определялось из /2/ при $\bar{z} = \pm 0,5$ см для области радиусов $r = /10-100/$ см и $\bar{z} = \pm 1$ см для $r > 100$ см

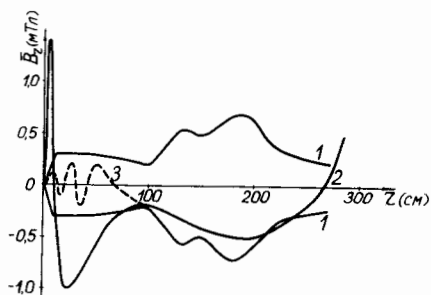


Рис.1. Радиальная компонента магнитного поля ускорителя: 1 - допустимое значение \bar{B}_r ; 2 - первоначальное измерение \bar{B}_r ; 3 - результаты коррекции \bar{B}_r .

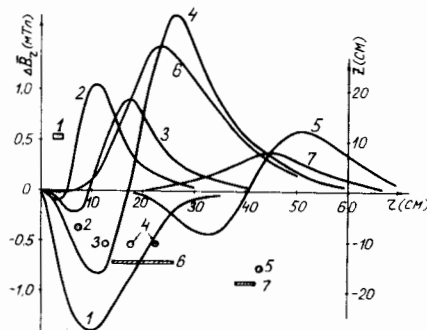


Рис.2. Влияние на радиальную компоненту магнитного поля шиммирующих ферромагнитных элементов: 1 - кольцевая шимма; 2-5 - секторные прутки; 6, 7 - секторные шиммы.

с использованием характеристик вертикальной компоненты сформированного магнитного поля установки "Ф". В центральной области ускорителя / $r \leq 10$ см / требования к \bar{B}_r формулировались на основании динамических расчетов движения заряженных частиц^[2]. Результаты расчетов приведены на рис.1 / кривые 1/. В качестве метода определения \bar{B}_r использовался способ, описанный в работе^[3], который заключается в определении разницы между значениями средней составляющей вертикальной компоненты магнитного поля в плоскостях, отстоящих от средней плоскости зазора камеры на величину ± 8 мм.

Результаты первоначального измерения средней радиальной компоненты установки "Ф" приведены на рис.1 / кривая 2/. Видно, что в области радиусов ускорителя $r \geq 70$ см величина \bar{B}_r находится в пределах допустимых значений. В центральной области значение \bar{B}_r в несколько раз превышает допустимую величину.

При коррекции \bar{B}_r в центральной области ускорителя была использована следующая методика: выделены экспериментальным способом вклады различных ферромагнитных элементов шиммирования магнитного поля, путем расчета определены их оптимальные параметры для получения минимально возможной радиальной компоненты в области коррекции и проведена экспериментальная проверка правильности расчета.

Параметры шиммирующих элементов, влияние которых на \bar{B}_r было выделено, приведены в табл.1. Вклады этих элементов и их расположение относительно средней плоскости камеры ускорителя показаны на рис.2 / нумерация кривых шиммирующих элементов на рис.2 и в таблице совпадает /.

Параметры шиммирующих элементов

№ пп	Название элемента	Радиальное и вертикал. положение /см/	Угловая протяженность при выделении вклада	Угловая протяженность при шиммировании
1.	Кольцевая шимма	$r_1=2,6, r_2=4,25$ $h_1=10,4, h_2=11,3$	360°	360°
2.	Секторный пруток / $\phi 10$ мм/	$\bar{r}=7,5, \bar{h}=7,5$	$30^\circ \times 4$	$30^\circ \times 4$
3.	Секторный пруток / $\phi 10$ мм/	$\bar{r}=12,5, \bar{h}=10,5$	$60^\circ \times 4$	$48^\circ \times 4$
4.	Пара секторных прутков	$\bar{r}_1=17,5, \bar{r}_2=22,5$ $\bar{h}_1=\bar{h}_2=10,5$	$60^\circ \times 4$	$\pm 8^\circ \times 4$
5.	Секторный пруток	$\bar{r}=42,5, \bar{h}=15$	$60^\circ \times 4$	$\pm 15^\circ \times 4$
6.	Секторная шимма / $\Delta h=2$ мм/	$r_1=14, r_2=26$ $h_1=14$	$60^\circ \times 4$	$25^\circ \times 4$
7.	Секторная шимма / $\Delta h=2$ мм/	$r_1=38, r_2=42$ $h_1=18$	$60^\circ \times 4$	$60^\circ \times 4$

В расчете параметров шиммирующих элементов, который проводился на основе использования метода наименьших квадратов, проводилось варьирование положения этих элементов и их угловой протяженности. Расчет показал необходимость использования всех элементов, их оптимальная угловая протяженность также приведена в табл.1. Для тех элементов, которые уже были установлены в магнитной системе для шиммирования вертикальной компоненты магнитного поля с целью максимального уменьшения ее возмущений, было использовано их перераспределение относительно средней плоскости камеры ускорителя. Параметры таких элементов отмечены в табл.1 знаками \pm .

На рис.3 / кривая 3 / показано расчетное распределение по радиусу скорректированной средней радиальной компоненты магнитного поля, результаты экспериментальных исследований характеризуются кривой 2. Результаты шиммирования радиальной компоненты поля в центральной области ускорителя приведены также на рис.1 / кривая 3/. Видно, что скорректированное значение \bar{B}_r не превышает величин $\pm 0,2$ мТл, что соответствует вертикальному смещению орбиты ускоряемых частиц от средней плоскости зазора ускорительной камеры не более чем на 5 мм.

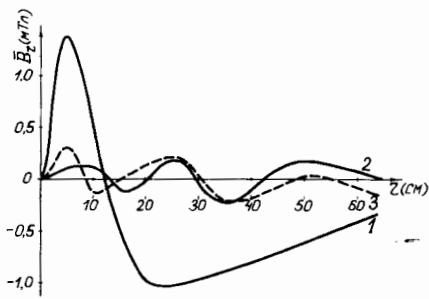


Рис.3. Радиальная компонента поля в центральной области ускорителя: 1 - первоначальные измерения \bar{B}_r ; 2 - результаты коррекции \bar{B}_r ; 3 - расчет предполагаемого распределения \bar{B}_r .

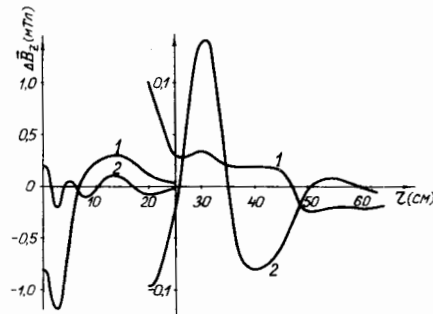


Рис.4. Распределение $\Delta \bar{B}_z$ в центральной области фазотрона: 1 - первоначальные измерения; 2 - измерения после коррекции \bar{B}_r .

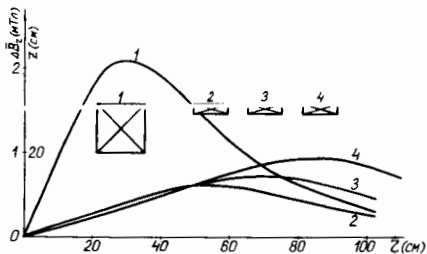


Рис.5. Влияние на радиальную компоненту магнитного поля несимметричного питания концентрических обмоток.

Таблица 2

Параметры концентрических обмоток

Параметр	№ пп	1	2	3	4
r_1 / r_2	/см/	21,5/35,5	49/59	67/75	81/91
h_1 / h_2	/см/	20/32	29/32	29/32	29/32
$I_{\text{макс}}$	/А/	60	17	17	17
Число витков		160	90	90	90

На рис.4 приведены распределения измеренных разностей средних составляющих вертикальной компоненты магнитного поля до и после шиммирования средней радиальной составляющей поля.

Таким образом, шиммирование средней радиальной компоненты магнитного поля установки "Ф" было осуществлено при помощи только ферромагнитных шиммирующих элементов. Для настройки ускорителя по положению ускоренного пучка возможна запитка разными токами верхней и нижней секций соответствующей концентрической обмотки.

На рис.5 показаны геометрия концентрических обмоток установки "Ф" и их влияние на радиальную компоненту магнитного поля при запитке только одной секции максимальным током. Параметры обмоток приведены в табл.2.

2. ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУД И ФАЗ

ГАРМОНИК ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Низшие гармоники /1-4/ радиальной и азимутальной компонент магнитного поля определялись при помощи высокоэффективного метода, описанного в^{/3/}, суть которого заключается в измерении поля при помощи датчиков Холла, жестко сориентированных в радиальном либо в азимутальном направлениях. Систематические ошибки измерения, связанные с неточностью ориентации датчиков и с планарным эффектом, выделяются расчетным путем. В работе^{/3/} показано, что эти ошибки для 1-й и 3-й гармоник определяются только общим перекосом штанги δ_1 относительно средней плоскости зазора магнитной системы ускорителя:

$$\Delta(B_1) \sim \delta_1 \bar{B}_z,$$

$$\Delta(B_3) \sim \delta_1 B_{z4}.$$

/4/

Точность определения 2-й гармоники горизонтальных компонент поля не зависит от геометрии измерительной системы и планарного эффекта. Измерения положения этой системы относительно плоскости спиральных шимм показали, что $\delta_1 = 0,25 \cdot 10^{-3}$ с фазой $-\pi/2$. Это дает ошибку определения первой гармоники $\sim 0,2-0,3$ мТл. Так как измерение всех рабочих радиусов установки "Ф" производилось при помощи трех датчиков, каждый из которых захватывал область радиусов в 100 см и имел различное положение и коэффициент планарного эффекта, то отсутствие скачков в результатах измерений для 1-й и 3-й гармоник на границах областей измерений каждого датчика подтверждает выводы работы^{/3/}.

На рис.6-9 приведены амплитуды и фазы первой, второй и третьей гармоник радиальной и азимутальной компонент магнитного поля установки "Ф". Расчеты по /3/ показывают, что максимальный вклад в гармоники вынужденных колебаний орбиты заряженных частиц дает

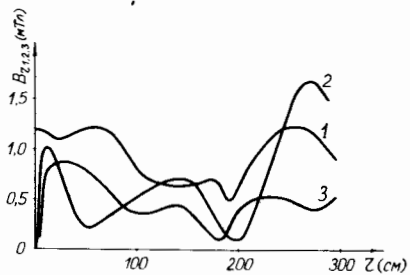


Рис.6. Амплитуды первых трех гармоник радиальной компоненты магнитного поля.

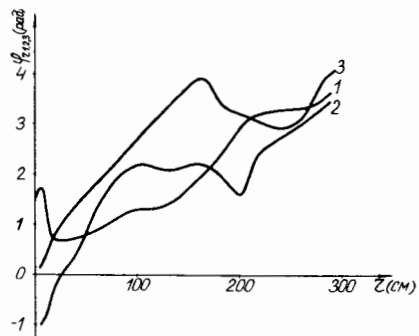


Рис.7. Фазы первых трех гармоник радиальной компоненты магнитного поля.

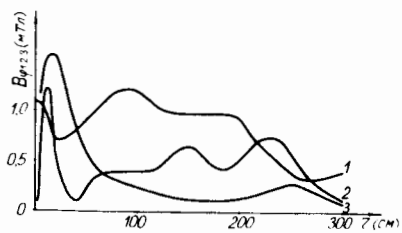


Рис.8. Амплитуды первых трех гармоник азимутальной компоненты магнитного поля.

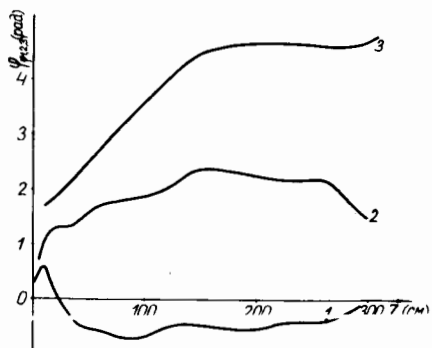


Рис.9. Фазы первых трех гармоник азимутальной компоненты магнитного поля.

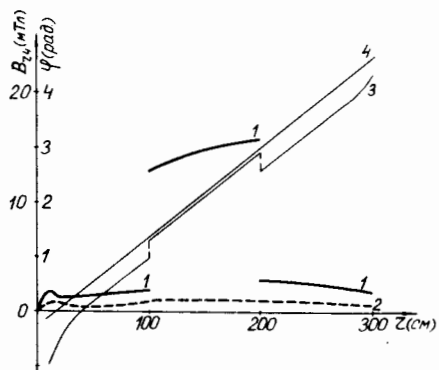


Рис.10. Характеристики магнитного поля: 1 - B_{r4} изм.; 2 - B_{r4} ; 3 - ϕ_{r4} изм.; 4 - ϕ_{z4} .

первая гармоника радиальной компоненты поля в зоне конечных радиусов, он составляет не более 1,5 мм.

Использование жестко фиксированных датчиков Холла для определения 4-й гармоники горизонтальных компонент приводит к измерениям этой гармоники с существенной систематической ошибкой, которая пропорциональна $\sqrt[3]{(\bar{\delta} + 2K_{\Pi} \bar{B}_z) V_{z4}}$, где $\bar{\delta}$ - средняя составляющая перекоса датчика относительно средней плоскости зазора ускорительной камеры, K_{Π} - чувствительность датчика Холла к планарному эффекту. Так как каждый датчик Холла имеет свое значение δ и K_{Π} , это приводит к тому, что измеренные распределения B_{r4} и $B_{\phi4}$ имеют разрывы на границах диапазонов каждого датчика /рис.10, кривая 1; рис.12, кривая 1/. В работе ^{13/} показано, что при выполнении условия

$$\frac{dB_{z4}}{dr} \ll 4 B_{z4} \frac{d\phi_{z4}}{dr} \quad /5/$$

можно считать, что

$$B_{r4} = B_{r4 \text{ изм.}} \sin 4(\phi_{z4} - \phi_{r4 \text{ изм.}}),$$

$$\phi_{r4} = \phi_{z4} + \frac{\pi}{8},$$

$$B_{\phi4} = -B_{\phi4 \text{ изм.}} \sin 4(\phi_{z4} - \phi_{\phi4 \text{ изм.}}),$$

$$\phi_{\phi4} = \phi_{z4} - \frac{\pi}{8}.$$

/6/

Как видно из рис.11, условие /5/ выполняется для области рабочих радиусов $r = 40-210$ см. Коэффициент систематической ошибки определения 4-й гармоники $A = \bar{\delta} + 2K_{\Pi} \bar{B}_z$ может быть определен как

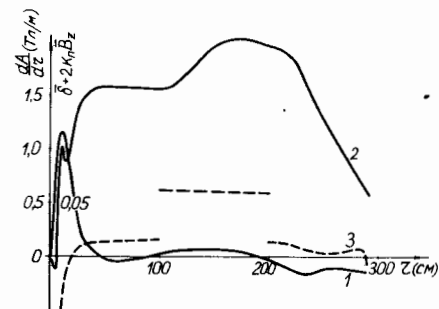


Рис.11. Характеристики магнитного поля: 1 - $\frac{dB_{z4}}{dr}$; 2 - $4B_{z4} \frac{d\phi_{z4}}{dr}$; 3 - $\bar{\delta} + 2K_{\Pi} \bar{B}_z$.

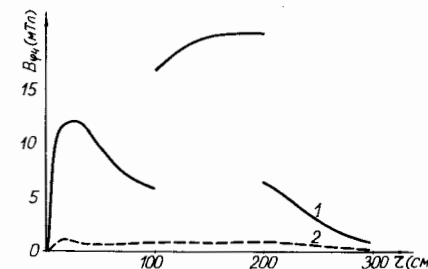


Рис.12. Характеристики магнитного поля: 1 - $B_{\phi4}$ изм.; 2 - $B_{\phi4}$.

$$A_r = \frac{B_{r4 \text{ ИЗМ.}}}{B_{z4}} \sin 4 \left(\phi_{z4} - \phi_{r4 \text{ ИЗМ.}} + \frac{\pi}{8} \right),$$

171

$$A_\phi = \frac{B_{\phi 4 \text{ ИЗМ.}}}{B_{z4}} \sin 4 \left(\phi_{\phi 4 \text{ ИЗМ.}} - \phi_{z4} + \frac{\pi}{8} \right).$$

Вычисленный таким образом коэффициент A может изменяться по двум причинам: 1/ из-за изменений B_z в зависимости от радиуса; 2/ из-за нарушения условия /5/.

Путем измерения радиальной компоненты датчиками Холла при прямом и обратном включении катушки возбуждения электромагнита было найдено соотношение между коэффициентом K_Π и δ . Оказалось, что член $2K_\Pi B_z$ составляет не более 0,1 δ , а так как изменение B_z в соответствующем диапазоне радиусов составляет не более 10%, то изменение коэффициента A , вызываемое влиянием B_z , составляет не более 1% его величины.

Расчеты коэффициента A_r показали, что он начинает существенно меняться только в области радиусов, где нарушается условие /5/ /рис.11, кривая 3/. Поэтому для области радиусов $r < 50$ см, $r > 210$ см при пересчете измеренного значения B_{r4} , $B_{\phi 4}$ в истинное в качестве коэффициента A бралось его значение на радиусах $R = 50, 210$ см. Результаты истинного значения 4-й гармоники горизонтальных компонент приведены на рис.10 и 12, кривые 2. Расчеты по /3/ показывают, что амплитуды этих гармоник не приводят к существенному искажению орбиты ускоряемых частиц.

Авторы благодарят А.Н.Кокарева за большой объем экспериментальных работ, С.И.Чеснову, Г.Н.Сайфулину за помощь в проведении магнитных измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аленицкий Ю.Г., Заплатин Н.Л., Морозов Н.А. ОИЯИ, 9-80-792, Дубна, 1980.
2. Ворожцов С.Б., Дмитриевский В.П., Заплатин Н.Л. ОИЯИ, Р9-81-711, Дубна, 1981.
3. Морозов Н.А., Шишлянников П.Т. ОИЯИ, Р9-80-889, Дубна, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 декабря 1982 года.

Заплатин Н.Л. и др.
Определение и коррекция положения медианной поверхности магнитного поля фазотрона ОИЯИ

Р9-82-925

Приведены результаты измерения и исправления положения медианной поверхности магнитного поля сильноточного фазотрона ОИЯИ. Представлены данные по измерению горизонтальных компонент магнитного поля. Для определения средней составляющей радиальной компоненты поля использовалось измерение разности средних составляющих вертикальной компоненты магнитного поля в двух плоскостях, отстоящих от средней плоскости зазора ускорительной камеры на ± 8 мм. Гармоники горизонтальных компонент поля определялись при помощи датчиков Холла, жестко закрепленных на измерительной штанге. После перераспределения ферромагнитных элементов магнитной системы фазотрона отклонение медианной поверхности поля от средней плоскости зазора не превышает ± 5 мм.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Zaplatin N.L.
Magnetic Field Median Plane Determination and Shaping for the JINR Phasotron

Р9-82-925

The measurement and correction of the magnetic field median plane of the JINR high current phasotron are described. The data on the measurement of the horizontal field components are presented. The measurement of the difference of the vertical field components in two planes at 8 mm distance from the median plane of the magnet gap was used for the mean radial component of the magnetic field. The Hall effect transducer rigidly fixed on the coordinate system was selected for determining Fourier harmonics of the magnetic field horizontal components. After the iron elements of the magnetic system reassembling the magnetic field median plane deviation from the gap median plane is not over ± 5 mm.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.