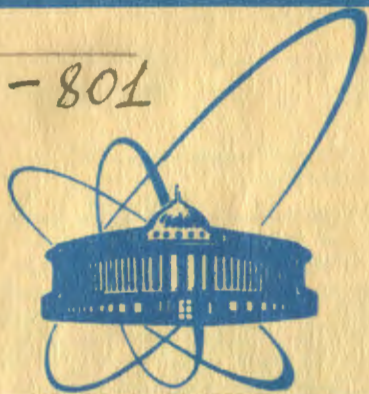


M-801



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

2308/2-81

11/5-81

P9-80-889

Н.А.Морозов, П.Т.Шишлянников

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
МЕДИАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
СИЛЬНОТОЧНОГО ФАЗОТРОНА

1980

## I. ВВЕДЕНИЕ

Точность изготовления магнитной системы сильноточного фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля /установка "Ф"/ и разброс магнитных характеристик материала могут привести к значительным искажениям медианной поверхности магнитного поля. Искажение медианной поверхности приводит к появлению в средней плоскости магнитной системы радиальной компоненты магнитного поля:

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

что вызывает в движении ускоряемых частиц вынужденные вертикальные колебания, постоянная составляющая и гармоники которых записываются в виде /1/:

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

$$z_k(r) = \frac{r B_{rk}(r)}{B_z(r) \cdot [Q_z^2(r) - k^2]}, \quad /3/$$

где вертикальная составляющая магнитного поля записывается

в виде /1/,  $n = \frac{r}{\bar{B}_z(r)} \frac{d\bar{B}_z(r)}{dr}$ ,  $Q_z(r)$  - частота свободных вертикальных колебаний. Кроме того, на некоторых рабочих радиусах

возможно возбуждение линейного разностного резонанса связи  $Q_r - Q_z = 1$  по первой гармонике радиальной компоненты магнитного поля.

Эти соображения указывают на необходимость включения в программу формирования магнитного поля установки "Ф" измерения и шиммирования горизонтальных компонент магнитного поля.

Опыт измерения радиальной компоненты магнитного поля на циклотроне У-120М при помощи подвешенного на нити датчика Холла /2/ показал, что этот метод требует значительного времени для получения полной топографии магнитного поля, а точность измерений получается недостаточно высокой.

В данной работе предлагается методика измерений горизонтальной компоненты магнитного поля, позволяющая значительно сократить время измерений при достаточной их точности.

## II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ РАДИАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Используя теорему Гаусса  $\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \oint_V \text{div} \vec{B} dV = 0$  для цилиндрического объема, в основании которого находится круг с радиусом  $R$  и высотой  $2a$ , выделенного в средней плоскости зазора ускорительной камеры, можно получить

$$\bar{B}_r(R) = -\frac{1}{2aR} \int_0^R \Delta \bar{B}_z(r) \cdot r \cdot dr, \quad /4/$$

где

$$\Delta \bar{B}_z(r) = \bar{B}_z(r, a) - \bar{B}_z(r, -a),$$

$$\bar{B}_r(R) = \frac{1}{2a} \int_{-a}^a \bar{B}_r(R, z) \cdot dz.$$

Полагая, что радиальная компонента линейно зависит от  $z$  внутри интервала  $[a, -a]$ , можно считать, что значение  $\bar{B}_r(R)$ , вычисленное по формуле /4/, совпадает со значением  $\bar{B}_r(R)$  в плоскости  $z=0$ .

Таким образом, для определения  $\bar{B}_r$  достаточно измерить разницу между значениями средней составляющей вертикальной компоненты магнитного поля в плоскостях, отстоящих от средней на величину  $\pm a$ .

В отличие от непосредственного измерения  $B_r$ , где угловая неточность ориентации  $\delta$  преобразователя магнитного поля относительно радиальной компоненты приводит к систематической ошибке  $B_z \cdot \delta$ , такая же неточность ориентации при измерении  $B_z (\Delta B_z)$  приводит к значительно меньшим погрешностям  $(-\frac{1}{2} \delta^2 \cdot B_z)$ .

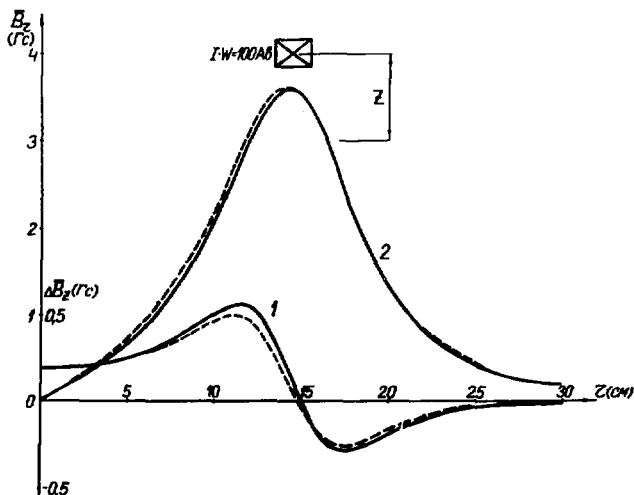
Наиболее простым и поддающимся точной настройке является индукционный метод с двумя соосными, параллельными друг другу, разнесенными по  $z$  на величину  $2a$ , включенными встречно катушками.

Используя электронные интеграторы на базе современных операционных усилителей, можно достаточно легко получить требуемую разрешающую способность такого дифференциального измерителя магнитного поля. Намотку катушек удобнее производить одновременно на общем каркасе. При этом их идентичность оказывается вполне удовлетворительной. При необходимости ее легко подогнать путем изменения числа витков одной катушки. Индикатором идентичности является отсутствие сигнала на выходе интегратора при вращении в любом направлении пары катушек в сильном однородном магнитном поле.

Определение  $\Delta \bar{B}_z(r)$  при этом производится так же, как и  $\bar{B}_z(r)$ , т.е. путем приближенного интегрирования по формуле Бесселя. Для этого необходимо иметь частные значения  $\Delta B_z$  в  $2n$  равноотстоящих по азимуту точках на выбранном радиусе  $R$ .

Для определения  $\Delta B_z$  не обязательно удалять из магнита или переворачивать катушки относительно оси симметрии на  $180^\circ$ , как это обычно делается при измерении  $B_z$ , так как само перемещение датчика из одной точки измерения в другую достаточно, чтобы дискриминировать  $\Delta B_z$ . Такая методика более предпочтительна, так как датчик разностного эффекта оказывается неподвижным относительно координатного устройства, и, самое главное, он не чувствует уровня  $B_z$ , который имеет весьма большое значение - может быть недостаточно стабилен, иметь пульсации.

Для проверки предложенной методики были проведены измерения радиальной компоненты магнитного поля азимутально-симметричного поля и магнитного поля с вариацией  $B_z$ . Результаты этих измерений в сравнении с расчетами приведены на рисунке. Видно, что среднюю составляющую радиальной компоненты можно измерить с точностью не хуже  $\pm 0,1$  Гс. Эта абсолютная погрешность остается одинаковой как для азимутально-симметричного магнитного поля, так и для поля с глубокой вариацией.



1 -  $\Delta \bar{B}_z(r)$  для концентрической обмотки /  $z_1 = 4,6$  см,  $z_2 = 5,4$  см /; 2 -  $\bar{B}_z(r)$  для концентрической обмотки /  $z = 5$  см / . — расчет, ---- эксперимент.

### III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАРМОНИК РАДИАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

На установке "Ф" гармоники /1-4/ радиальной компоненты магнитного поля предполагается измерять при помощи датчиков Холла, жестко сориентированных в радиальном направлении на измерительной штанге. В этом случае датчик Холла кроме истинного значения радиальной компоненты замеряет добавки, связанные: а/с неточностью ориентации датчика по радиусу; б/с планарным эффектом.

Результаты измерений могут быть записаны в следующем виде:

$$B_r(r, \phi)_{\text{изм.}} = \bar{B}_r + \sum_{i=1}^k B_{ri} \cdot \cos i(\phi - \phi_{ri}) + \left[ \bar{\delta} + \sum_{i=1}^k \delta_i \cos i(\phi - \phi_{\delta i}) \right] \cdot B_z(r, \phi) + K_{\Pi} \cdot B_z^2(r, \phi), \quad /5/$$

$$\text{где } B_z(r, \phi) = \bar{B}_z + \sum_{i=1}^k B_{zi} \cos i(\phi - \phi_{zi}), \quad /6/$$

$\delta$  - неточность ориентации датчика в радиальном направлении,  $K_{\Pi}$  - чувствительность датчика Холла к планарному эффекту. Гармонический анализ /5/ при учете членов с максимальным вкладом дает:

$$\bar{B}_r_{\text{изм.}} = \bar{B}_r + \bar{\delta} \bar{B}_z + K_{\Pi} \bar{B}_z^2,$$

$$A_{r1 \text{ изм.}} = B_{r1} \begin{Bmatrix} \cos \phi_{r1} \\ \sin \phi_{r1} \end{Bmatrix} + \delta_1 \bar{B}_z \begin{Bmatrix} \cos \phi_{\delta 1} \\ \sin \phi_{\delta 1} \end{Bmatrix},$$

$$A_{r2 \text{ изм.}} = B_{r2} \begin{Bmatrix} \cos 2\phi_{r2} \\ \sin 2\phi_{r2} \end{Bmatrix},$$

$$A_{z3 \text{ изм.}} = B_{r3} \begin{Bmatrix} \cos 3\phi_{r3} \\ \sin 3\phi_{r3} \end{Bmatrix} + \delta_1 B_{z4} \begin{Bmatrix} \cos(\phi_{\delta 1} - 4\phi_{z4}) \\ \sin(\phi_{\delta 1} - 4\phi_{z4}) \end{Bmatrix}, \quad /7/$$

$$A_{r4 \text{ изм.}} = B_{r4} \begin{Bmatrix} \cos 4\phi_{r4} \\ \sin 4\phi_{r4} \end{Bmatrix} + (\bar{\delta} + 2K_{\Pi} \bar{B}_z) \begin{Bmatrix} \cos 4\phi_{z4} \\ \sin 4\phi_{z4} \end{Bmatrix}.$$

Ошибка в определении 1-й и 3-й гармоник связана с первой гармоникой неточности ориентации датчика в радиальном направлении, т.е. общим перекосом измерительной штанги относительно

средней плоскости зазора магнитной системы. Для установки "φ" перекося штанги может быть доведен до 1 мм при диаметре полюсов 6000 мм, что дает ошибку в определении 1-й и 3-й гармоник не более 3 Гс.

Для выделения истинного значения 4-й гармоники радиальной компоненты магнитного поля необходимо знание постоянного перекося датчика Холла относительно средней плоскости  $\bar{\delta}(r)$  и чувствительности датчика к планарному эффекту -  $K_{\Pi}$ . Для выделения истинного значения 4-й гармоники  $\bar{B}_r$  предполагается использовать два способа:

1/. Проведение измерений  $\bar{B}_r$  при прямом и обратном направлениях магнитного поля в зазоре камеры ускорителя. Тогда из /7/ следует:

$$\begin{aligned}\bar{B}_{r\Pi} &= \bar{B}_r + \bar{\delta}\bar{B}_z + K_{\Pi}\bar{B}_z^2, \\ \bar{B}_{rO} &= -\bar{B}_r - \bar{\delta}\bar{B}_z + K_{\Pi}\bar{B}_z^2.\end{aligned}\quad /8/$$

Так как  $\bar{B}_r$  определено с большой точностью при помощи методики, описанной в п. II, получим:

$$\begin{aligned}K_{\Pi} &= \frac{\bar{B}_{r\Pi} + \bar{B}_{rO}}{2\bar{B}_z^2} \\ \bar{\delta}(r) &= \frac{\bar{B}_{r\Pi} - \bar{B}_{rO} - K_{\Pi}\bar{B}_z^2}{\bar{B}_z}.\end{aligned}\quad /9/$$

2/. Используя равенство нулю  $\phi$ -компоненты  $\text{rot}\vec{B}$ :

$$\frac{\partial B_r}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial r} = 0,$$

можно получить для 4-й гармоники  $B_r$ :

$$\begin{aligned}\frac{dB_{r4}}{dz} \cos 4(\phi - \phi_{r4}) + 4B_{r4} \frac{d\phi_{r4}}{dz} \sin 4(\phi - \phi_{r4}) = \\ = \frac{dB_{z4}}{dr} \cos 4(\phi - \phi_{z4}) + 4B_{z4} \frac{d\phi_{z4}}{dr} \sin 4(\phi - \phi_{z4}).\end{aligned}\quad /10/$$

В установке "φ" для зоны радиусов  $r \geq 15$  см:

$$4B_{r4} \frac{d\phi_{r4}}{dz} \ll \frac{dB_{r4}}{dz},$$

$$\frac{dB_{z4}}{dr} = \frac{1}{20} \cdot 4B_{z4} \frac{d\phi_{z4}}{dr},$$

что дает

$$\frac{dB_{r4}}{dz} \cos 4(\phi - \phi_{r4}) \cong B_{z4} \frac{d\phi_{z4}}{dr} \sin 4(\phi - \phi_{z4}). \quad /11/$$

Из /11/ следует, что фаза истинной 4-й гармоники  $B_r$ -компоненты на  $\pi/2$  опережает фазу 4-й гармоники  $B_z$ -компоненты, отсюда следует:

$$B_{r4} = B_{r4 \text{ изм.}} \cdot \sin 4(\phi_{r4 \text{ изм.}} - \phi_{z4}). \quad /12/$$

Для зоны радиусов  $r < 15$  см можно считать

$$[\bar{\delta}(r) + 2K_{11} \bar{B}_z(r)] = \text{const} = [\bar{\delta} + 2K_{11} \bar{B}_z]_{r=15}.$$

#### IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАРМОНИК АЗИМУТАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Азимутальную компоненту магнитного поля установки  $\phi$  предполагается измерять также при помощи датчиков Холла, ориентированных в азимутальном направлении. Все выводы п. III остаются справедливыми, за исключением того, что безусловно  $\bar{B}_\phi = 0$  и из равенства нулю  $r$ -компоненты  $\text{rot } \bar{B}$  следует, что фаза истинной 4-й гармоники  $B_\phi$ -компоненты отстает от фазы 4-й гармоники  $B_z$  на  $\pi/2$ . Вследствие этого

$$B_{\phi 4} = B_{\phi 4 \text{ изм.}} \cdot \sin 4(\phi_{\phi 4 \text{ изм.}} + \phi_{z4}). \quad /13/$$

Из равенства нулю  $z$ -компоненты  $\text{rot } \bar{B}$  вытекает следующая связь между амплитудами и фазами гармоник  $B_\phi$  и  $B_r$  - компонент магнитного поля:

$$B_{r1} = \frac{1}{i} \left[ \left( B_{\phi 1} + r \frac{dB_{\phi 1}}{dr} \right)^2 + \left( r \cdot i \cdot B_{\phi 1} \frac{d\phi_{\phi 1}}{dr} \right)^2 \right]^{1/2},$$

$$\phi_{r1} = \phi_{\phi 1} + \frac{\pi}{i} - \frac{\alpha_1}{i},$$

/14/

$$\alpha_1 = \arcsin \left\{ \frac{\left( B_{\phi 1} + r \frac{dB_{\phi 1}}{dr} \right)}{\left[ \left( B_{\phi 1} + r \frac{dB_{\phi 1}}{dr} \right)^2 + \left( r \cdot i \cdot B_{\phi 1} \frac{d\phi_{\phi 1}}{dr} \right)^2 \right]^{1/2}} \right\}.$$

Соотношения /14/ могут быть использованы для проверки правильности определения горизонтальных компонент магнитного поля.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методики измерений горизонтальных компонент магнитного поля позволят увеличить точность и сократить время измерений одной карты поля /шаг по радиусу 2,5 см, по азимуту - 5°/ до 6 ч.

Авторы благодарят В.П.Дмитриевского за полезные дискуссии и постоянное внимание к работе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриевский В.П. и др. ОИЯИ, Р -1057, Дубна 1962.
2. Василевская Д.П., Денисов Ю.Н. ПТЭ, 1961, 5, с. 194.

Рукопись поступила в издательский отдел  
31 декабря 1980 года.