

АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ, КОНТРОЛЬНЫЕ И ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.384.66

В. А. ПАПАДИЧЕВ, Ю. А. ЯКОБИ
(Новосибирск)

ОБ ИЗМЕРЕНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В УСКОРИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ МЕТОДОМ СПАРЕННЫХ КАТУШЕК

В современных циклических ускорителях заряженных частиц последние удерживаются магнитным полем в вакуумной камере в течение нескольких миллионов оборотов. В процессе ускорения возникают колебания частиц относительно равновесной орбиты. Эти колебания являются устойчивыми и не приводят к потере частиц лишь при определенных, выдержанных с большой точностью конфигурациях магнитного поля, характеризуемых так называемым показателем спада:

$$n = - \frac{R}{H_z} \frac{\partial H_z}{\partial r}, \quad (1)$$

где R — радиус равновесной орбиты; H_z — проекция вектора магнитной напряженности на ось, перпендикулярную к медианной плоскости; r — радиус, на котором производится измерение.

Устойчивость колебаний достигается в интервале $0 < n < 1$. Этот диапазон пересечен рядом запрещенных резонансных значений n с интервалом $0,1 - 0,2$ [1]. Таким образом, погрешность измерения n не должна превышать нескольких процентов.

В переменном магнитном поле градиент поля $\frac{\partial H_z}{\partial r} \approx \frac{\Delta H_z}{\Delta r}$ может быть измерен с помощью двух индукционных катушек, оси которых па-

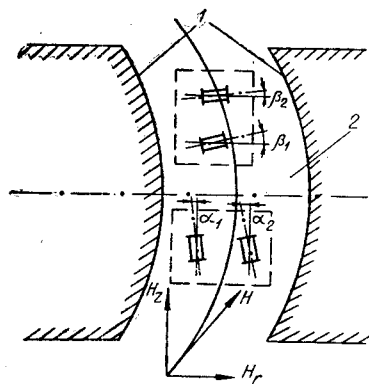


Рис. 1. Схема расположения датчиков в вакуумной камере ускорителя:

1 — токоведущие шины; 2 — вакуумная камера. В верхней части камеры блок спаренных катушек для измерения $\frac{\partial H_r}{\partial z}$, в нижней — блок для измерения

ния $\frac{\partial H_z}{\partial r}$.

параллельны и направлены по оси z . Из-за потенциальности магнитного поля

$$\frac{\partial H_z}{\partial r} = -\frac{\partial H_r}{\partial z} \quad (2)$$

В ряде случаев измерение вертикального градиента r -составляющей может оказаться предпочтительней [2]. Расположение спаренных катушек в вакуумной камере ускорителя в обоих вариантах измерения показано на рис. 1. На рисунке изображен фрагмент безжелезной одновитковой магнитной системы [3], на которой авторы производили измерения.

Рассмотрим основные погрешности в обоих вариантах. Для сигнала с одной из катушек имеем:

$$V_z = S H_z + S H_r \alpha; \quad V_r = S H_r + S H_z \beta, \quad (3)$$

где S — чувствительность катушки (на данной частоте); α и β — углы между осью катушки и измеряемой компонентой поля ($\alpha, \beta \ll 1$). Для разностного сигнала, пренебрегая членами второго порядка малости, получим:

$$\Delta V_z = S \Delta H_z + H_z \Delta S; \quad \Delta V_r = S \Delta H_r + S H_r \Delta \beta. \quad (4)$$

Таким образом, при измерении $\frac{\partial H_z}{\partial r}$ основным источником ошибок является разность чувствительностей, а при измерении $\frac{\partial H_r}{\partial z}$ — непараллельность катушек. Измерение вертикальной составляющей магнитного поля, а также линейных величин с погрешностью менее 1% не представляет серьезных затруднений. С учетом этого обстоятельства из формул (1), (2) и (4) имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta n}{n} &= \frac{\Delta S}{S} \frac{R}{\Delta r n} \quad \text{при измерении } \frac{\partial H_z}{\partial r}; \\ \frac{\Delta n}{n} &= \Delta \beta \frac{R}{\Delta z n} \quad \text{при измерении } \frac{\partial H_r}{\partial z}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для ускорителей со слабой фокусировкой $\frac{R}{l} \approx 10 \div 15$, где l — максимальный линейный размер вакуумной камеры, и $n \approx 0,6$. Топография магнитного поля в камере может быть достаточно хорошо изучена при условии $\frac{\Delta l}{l} \approx 0,1$, где Δl — расстояние между осями катушек. Практически достижимая точность уравнивания чувствительностей $\frac{\Delta S}{S} \approx 10^{-4}$

[1], возможная степень достижения параллельности осей катушек того же порядка $\Delta \beta \approx 10^{-4} \text{ рад}$ [2]. Из (5) следует, что при этом погрешность определения составляет около 2%. Такую точность можно считать удовлетворительной, но она достигается на пределе экспериментальных возможностей.

Ниже описываются методы, которые позволяют обеспечить требуемую точность даже при сравнительно грубой подгонке чувствительностей и параллельности катушек. Как будет ясно из дальнейшего, эти методы позволяют также устранить ошибки, связанные с помехами от источника магнитного поля. Помехи σ на катушки обусловлены наличием паразитных емкостных и индукционных связей и зависят от взаимного расположения датчика, его выводов и цепей питания магнита. Если датчик помещается в небольших пределах, что имеет место при измерениях на данном азимуте, помехи можно считать постоянными. Измерения произво-

дидлись на частотах 10 гц — 1 кгц. В последующих расчетах мы предполагаем отсутствие фазового сдвига между сигналами с катушек, а также их взаимного влияния друг на друга.

Компенсация погрешностей при измерении $\frac{\partial H_z}{\partial r}$ методом поворота.

Остановимся сначала на измерении $\frac{\partial H_z}{\partial r}$. При этом разностный сигнал $\Delta V'_z = S \Delta H_z + H_{z1} \Delta S + \Delta \sigma$. Повернем теперь датчик на 180° вокруг оси z. После этого $\Delta V''_z = -S \Delta H_z + H_{z2} \Delta S + \Delta \sigma$. Возьмем среднее из двух результатов измерений

$$\overline{\Delta V_z} = \frac{|\Delta V'_z| + |\Delta V''_z|}{2} = S \Delta H_z + \frac{\Delta S \Delta H_z}{2}. \quad (6)$$

Из (1) и (6) получаем

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{\Delta S}{2S}. \quad (7)$$

Из сравнения (5) и (7) следует, что описанный прием позволяет уменьшить погрешность в $\frac{2R}{n \Delta r}$ раз, что при указанных выше характерных значениях параметров означает выигрыш в точности в 300—500 раз. Очевидно, что, используя этот метод для определения n с погрешностью до 1%, достаточно иметь $\frac{\Delta S}{S} \approx 10^{-2}$. При этом становится существенной уже сама точность снятия отсчета с измерительного прибора. Поэтому следует пользоваться прибором высокого класса точности или дифференциальным методом измерения.

Компенсация погрешностей при измерении $\frac{\partial H_r}{\partial z}$ методом поворота.

Аналогично можно резко уменьшить погрешность при измерении $\frac{\partial H_r}{\partial z}$.

$$\Delta V'_r = S \Delta H_r + S H_z \Delta \beta + \Delta S H_z \beta'_1 + \Delta S H_{r1} + \Delta \sigma.$$

Повернем теперь датчик на 180° вокруг оси z. Тогда

$$\Delta V''_r = -S \Delta H_r + S H_z \Delta \beta + \Delta S H_z \beta''_1 - \Delta S H_{r1} + \Delta \sigma.$$

Возьмем среднее

$$\begin{aligned} \overline{\Delta V_r} &= \frac{|\Delta V'_r| + |\Delta V''_r|}{2} = \\ &= \frac{n}{R} S H_z \left[\Delta z_0 + z_1 \frac{\Delta S}{S} + \frac{R}{n} \frac{(\beta'_1 - \beta''_1)}{2} \frac{\Delta S}{S} \right], \end{aligned} \quad (8)$$

где β'_1 и β''_1 — углы (в вертикальной плоскости) между осью первой катушки и осью r соответственно до и после поворота; Δz_0 — расстояние между осями катушек; z_1 — удаление оси первой катушки от медианной плоскости. Легко видеть, что ошибка непараллельности и ошибка, связанная с наводками, полностью компенсируются. С учетом членов второго порядка малости из (1), (2) и (8) имеем

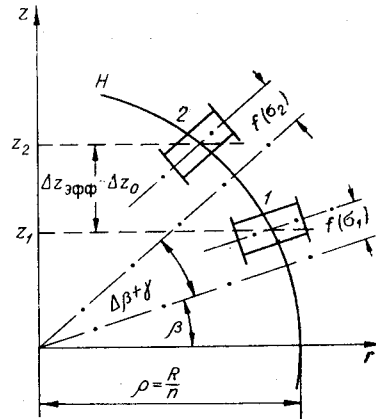
$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{\Delta S}{S \Delta z_0} \left[z_1 + \frac{R}{n} \frac{(\beta'_1 - \beta''_1)}{2} \right]. \quad (9)$$

Отсюда следует, что для измерения с погрешностью 1% необходимо $\frac{\Delta S}{S} \approx 10^{-3}$ (на краю камеры, где $z = z_{\max}$) и $(\beta_1' - \beta_1'') \approx 10^{-2}$. Вблизи медианной плоскости точность в несколько раз выше. Возникающие в этом методе дополнительные требования не являются жесткими.

Компенсация погрешностей при измерении $\frac{\partial H_r}{\partial z}$ методом «эффективного расстояния». Укажем теперь на другую возможность уменьшения погрешностей при измерении $\frac{\partial H_r}{\partial z}$. Она осуществляется путем замены величины Δz_0 параметром $\Delta z_{\text{эфф}}$. Он определяется из измерения «ме-

Рис. 2. Компенсация погрешностей при измерении $\frac{\partial H_r}{\partial z}$ методом «эффективного расстояния»:

1, 2 — индукционные катушки; ρ — радиус кривизны магнитного поля; β — перекося катушки I относительно медианной плоскости; $\Delta\beta$ — относительный перекося катушек; γ — поворот, вызванный люфтом механизма перемещения; $f(\sigma_1)$ и $f(\sigma_2)$ — смещения катушек, компенсирующие сигнал наводки; z_1 и z_2 — расстояния от медианной плоскости, на которых сигналы от первой и второй катушек соответственно обращаются в нуль; $\Delta z_{\text{эфф}} = \Delta z_0$ — поправка к геометрическому расстоянию между осями катушек.



дианной плоскости» порознь каждой катушкой (рис. 2). Из-за неточной установки и наводок эта процедура не является определением истинной медианной поверхности. В «медианной плоскости» сигнал от катушки должен обращаться в нуль:

$$V_{r1} = S H_{r1} + S H_z \beta + \sigma_1 = 0; \quad V_{r2} = S H_{r2} + S H_z (\beta + \Delta\beta + \gamma) + \sigma_2 = 0, \quad (10)$$

где γ — угол перекося датчика в вертикальной плоскости при перемещении по вертикали на величину порядка Δz_0 , обусловленный люфтом механизма перемещения. Отсюда находим:

$$z_1 = \frac{R}{n} \beta + \frac{\sigma_1 R}{S n H_z}; \quad z_2 = \frac{R}{n} (\beta + \Delta\beta + \gamma) + \frac{\sigma_2 R}{S n H_z}. \quad (11)$$

Переходя к системе координат, связанной с механизмом перемещения датчика, получаем

$$z_2' - z_1' \equiv \Delta z_{\text{эфф}} = \Delta z_0 + \frac{R}{n} \left(\Delta\beta + \gamma + \frac{\Delta\sigma}{V_z} \right). \quad (12)$$

Из (1), (2), (4) и (12) имеем

$$n = n_0 - \gamma / \left(\frac{\Delta z_0}{R} + \frac{\Delta\beta + \gamma + \frac{\Delta\sigma}{V_z}}{n} \right), \quad (13)$$

где n_0 — истинное значение показателя спада. Из сравнения (5) и (13) видно, что использование этого метода позволяет заменить требования к $\Delta\beta$ на аналогичные требования к γ , которые выполняются значительно

легче. Для получения n с погрешностью менее 2% необходимо иметь:
 $\gamma \approx 10^{-4}$ рад; $\Delta \beta \approx 10^{-2}$ рад, $\frac{\Delta \sigma}{V_z} \approx 10^{-2}$.

Последний метод очень прост и не требует какого-либо усложнения методики измерений. Параметр $\Delta z_{\text{эфф}}$ в принципе достаточно определить один раз. Разность $\Delta z_{\text{эфф}} - \Delta z_0$ может служить также для оценки параллельности катушек и ее постоянства во времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Л. Гольдин, С. В. Скачков, К. Н. Шорин. Магнитные измерения в ускорителях заряженных частиц. М., Госатомиздат, 1962.
2. В. А. Пападичев. Измерение показателя спада магнитного поля в ускорителях заряженных частиц.— ПТЭ, 1965, № 5.
3. Г. И. Будкер, А. А. Наумов. Импульсный безжелезный синхротрон.— Доклад на Всесоюзной конференции по физике частиц высокой энергии. М., 1956.

*Поступила в редакцию
23 октября 1969 г.,
окончательный вариант —
8 декабря 1969 г.*