

## МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ СПАДАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В УСКОРИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

И. Г. ЛЕЩЕНКО

(Представлено научным семинаром физико-технического факультета)

В ускорителях заряженных частиц, бетатронах и синхротронах, весьма важной характеристикой конфигурации управляющего магнитного поля является показатель спадания магнитного поля  $n$ .

Значение показателя спадания, как известно, определяется соотношением

$$n = - \frac{dH_z \cdot r}{H_z \cdot dr} \quad (1)$$

и должно в рабочей зоне ускорения лежать в пределах от нуля до единицы.

Все применяемые до настоящего времени способы определения показателя спадания магнитного поля (графоаналитический, аналитический и два дифференциальных) можно назвать косвенными методами. В этих методах используется кривая зависимости  $H_z = f(r)$ , получаемая экспериментальным путем.

Для определения показателя спадания магнитного поля графоаналитическим методом снимается зависимость напряжения, индуцируемого в измерительной катушке—щупе, от радиуса  $U_z = f(r)$ . По кривой (рис. 1) для заданного радиуса находят значения  $U_z$  и  $\Delta U_z$  и подсчитывается показатель спадания магнитного поля по формуле

$$n = \frac{\Delta U_z \cdot r}{U_z \cdot \Delta r} \quad (2)$$

Знак перед  $n$  "+", если поле спадает, и "-", если поле возрастает с ростом радиуса.

Степень точности определения  $n$  в этом случае зависит от точности измерения  $U_z = f(r)$  и от точности графических построений. С увеличением радиуса погрешность определения показателя спадания поля увеличивается и при радиусах более 100 см практически становится недопустимой (достигает 10 и более процентов), особенно при резких изменениях поля.

При аналитическом методе измеряется напряжение на зажимах катушки-щупа, устанавливаемой через одинаковые расстояния вдоль радиуса. Тогда значение  $n$  в какой-либо точке  $x$  может быть определено по выражению:

$$n_x = \frac{U_{x+1} - U_{x-1}}{U_x} \cdot \frac{r_x}{r_{x+1} - r_{x-1}}, \quad (3)$$

где  $x$  — порядковый номер точки.

Этот метод дает еще большую погрешность в определении  $n$ , чем графоаналитический метод, в котором ошибки измерения напряжения в отдельных точках сглаживаются при построении усредненной кривой  $U_z = f(r)$ . Аналитическим методом для определения  $n$  иногда пользуются в ускорительных установках с небольшими радиусами при условии хорошей стабилизации напряжения на намагничивающих обмотках электромагнита.

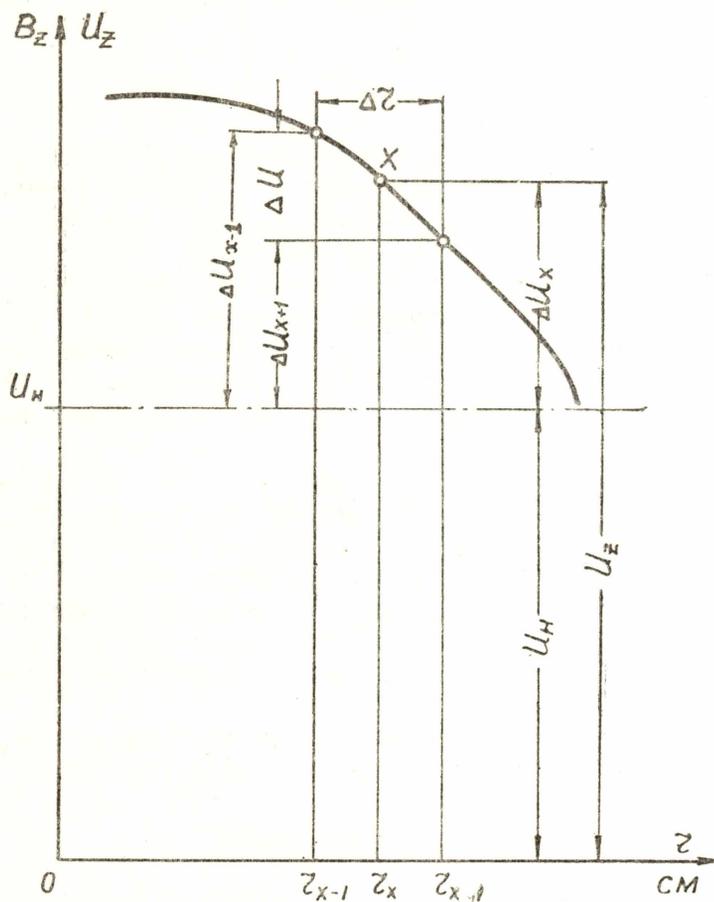


Рис. 1

Точность определения показателя спада магнитного поля значительно увеличивается с применением дифференциального метода измерения зависимости  $U_z = f(r)$ , вместо прямого. В этом случае применяются две встречновключенные измерительные катушки, одна из которых устанавливается неподвижно ( $U_H = \text{const}$ ), а другая передвигается по радиусу на данном азимуте, и измеряется разность напряжений  $\Delta U_x = U_x - U_H$ . Значение  $n$  определяется по формуле

$$n_x = \frac{\Delta U_{x+1} - \Delta U_{x-1}}{\Delta U_x + U_H} \cdot \frac{r_x}{r_{x+1} - r_{x-1}} \quad (4)$$

графоаналитическим или аналитическим методами.

Несмотря на общее повышение точности определения  $n$ , этот метод не лишен недостатка графоаналитических вычислений и, кроме того, обладает дополнительными погрешностями, вносимыми статической и фазовой неоднородностями магнитного поля, особенно при расположении неподвижной катушки на другом азимуте и при малых  $\Delta U_x$ .

Для устранения указанных погрешностей в определении показателя спада магнитного поля дифференциальным методом применяются две катушки по возможности с одинаковым эффективным сечением и с расстоянием между осями, равным  $\Delta r$ . В точке на радиусе  $r$ , где требуется определить  $n$ , измеряется разность  $\Delta U_1$  и напряжения катушек  $U_1$  и  $U_2$ , затем поворачиваются катушки на  $180^\circ$  так, чтобы они поменялись местами, и вновь измеряется разность напряжений  $\Delta U'_1$  и напряжения  $U'_1$  и  $U'_2$ . Искомое значение показателя спада магнитного поля определяется по формуле

$$n = 2 \frac{\Delta U_1 + \Delta U'_1}{U_1 + U_2 + U'_1 + U'_2} \cdot \frac{r}{\Delta r}. \quad (5)$$

Указанным методом можно с достаточной точностью определять показатель спада магнитного поля в ускорителях с большими радиусами. Однако следует считать существенным недостатком этого способа то, что он требует аналитических вычислений и изготовления точных приспособлений для поворота спаренных катушек в процессе измерения  $\Delta U$  и  $U$ .

Для определения полной топографии спада магнитного поля в зазоре между полюсного пространства подобные измерения необходимо проводить в разных плоскостях и на разных азимутах, что требует большой затраты времени. Вследствие этого полная топография магнитного поля исследовалась в ускорителях недостаточно.

В результате проведенных исследований нами разработаны способы непосредственного (прямого), быстрого и точного измерения показателя спада магнитного поля прибором, который мы называем  $n$ -метром.

В качестве датчика для измерения показателя спада магнитного поля служит магнитный щуп, состоящий из трех измерительных катушек с одинаковым эффективным сечением. Две крайние катушки щупа имеют расстояние между осями  $\Delta r$  и должны давать в спадающем магнитном поле значение  $\Delta U_z$ , а третья (средняя) —  $U_z$ .

Схемы для измерения  $n$  с применением указанных магнитных щупов ( $n$ -метры) основаны на двух методах, описываемых ниже.

### Метод сравнения

Если при расстоянии между центрами крайних катушек, равным единице, добиться такого напряжения  $U$  от средней катушки  $K_{cp}$  на радиусе  $r$ , при котором числовые значения  $U$  и  $r$  равны или кратны (с кратностью 1, 10, 100 и т. д.), то выражение для определения показателя спада магнитного поля может быть записано в виде:

$$n = K \cdot \Delta U, \quad (6)$$

где  $K$  — коэффициент пропорциональности, равный  $\frac{r}{U \cdot \Delta r}$ . При этом обяза-

тельным условием в месте расположения магнитного щупа является  $\Delta U/U = \text{const}$ . Получить это условие при изменении напряжения от средней катушки щупа можно путем изменения напряжения на зажимах обмоток электромагнита, что практически неудобно и не всегда возможно, или с помощью спаренных потенциометров, включенных в цепь средней и крайних катушек магнитного щупа так, что  $\Delta U/U = \text{const}$  и, следовательно, имеется возможность производить числовые сравнения напряжения и радиуса. При известном постоянном  $K$  шкала вольтметра может быть отградуирована в значениях  $n$ . Однако указанная схема [1] требует наличия двух чувствительных вольтметров с большим внутренним сопротивлением и двух спаренных потенциометров, к которым предъявляются весьма жесткие требования в смысле одновременности изменения сопротивления их плеч.

Применение в цепи средней катушки делителя напряжения с коэффициентом деления, равным коэффициенту  $K$ , и переключателя в виде тумблера позволило значительно упростить схему  $n$ -метра и повысить точность измерения показателя спада магнитного поля.

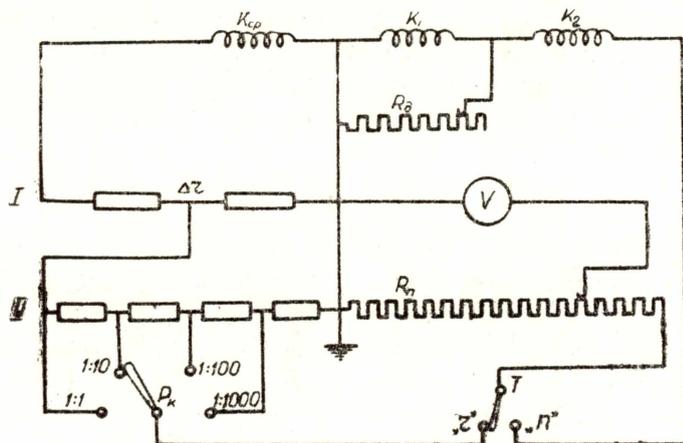


Рис. 2

Измерение  $n$  по такой схеме (рис. 2) производится в следующем порядке:

- 1) при включенном тумблере  $T$  на положение „ $r$ “ магнитный щуп  $n$ -метра помещается на заданный радиус  $r$ ,
- 2) делитель напряжения  $\Pi$  включается в положение, соответствующее коэффициенту пропорциональности  $K$ ,
- 3) потенциометром  $R_n$  устанавливается значение напряжения, численно равное или кратное  $r$ , например,  $0,48 \text{ вольт} \div 48 \text{ см}$ ,
- 4) тумблер переключается в положение „ $n$ “ и вольтметр дает непосредственный отсчет  $\Delta U$ , равный показателю спада магнитного поля на заданном радиусе.

Для учета  $\Delta r$ , которое может быть не равным единице, применяется дополнительный делитель напряжения  $I$  в цепи средней катушки с коэффициентом деления, численно равным  $\Delta r$  (рис. 2).

При изготовлении магнитного щупа практически невозможно получить все три катушки с одинаковым эффективным сечением, поскольку допустимая погрешность должна быть не более  $0,001\%$ . При разности эффективных сечений, составляющих  $0,01\%$ , значение  $n$  изменится на величину

$$\Delta n = \frac{1}{10000} \cdot \frac{r}{\Delta r}$$

Так, при  $r = 100 \text{ см}$  и  $\Delta r = 0,5 \text{ см}$ ,  $\Delta n = 0,02$ .

В магнитных щупах ошибка в намотке одного витка может вызвать искажение  $n$  на недопустимую величину. Поэтому, чтобы получить одинаковые эффективные сечения встречноключенных катушек с необходимой точностью, необходимо подключить параллельно катушке с большим эффективным сечением „посадочное“ активное сопротивление  $R_d$  (рис. 2). Величина сопротивления легко устанавливается при помещении щупа в строго однородное магнитное поле, в котором добиваются, чтобы  $\Delta U = 0$ . В качестве источника однородного магнитного поля может быть использован соленоид, в центральную часть которого помещается магнитный щуп так, чтобы его центр совпадал с осью соленоида.

Для получения катушек с большим эффективным сечением первоначально применялись трехкаркасные прямоугольные магнитные щупы, конструкция и размеры одного из которых представлены на рис. 3. Кроме того,

щуп с прямоугольными катушками удобнее делать монолитным со строго фиксированным расстоянием между центрами катушек, например,  $\Delta r = 1,00$  см. Позднее нами изготовлялись только двухкаркасные щупы (рис. 3). В таком щупе витки средней катушки наматываются непосредственно на две крайние. Этим самым, при том же расстоянии между центрами крайних катушек, получается щуп со значительно большим эффективным сечением каждой катушки, чем в трехкаркасном щупе. В настоящее время получили распространение только двухкаркасные магнитные щупы, эффективное сечение которых равно  $100-500$  см<sup>2</sup> (провод марки ПЭЛ 0,05 мм, число витков  $1200-5000$ ).

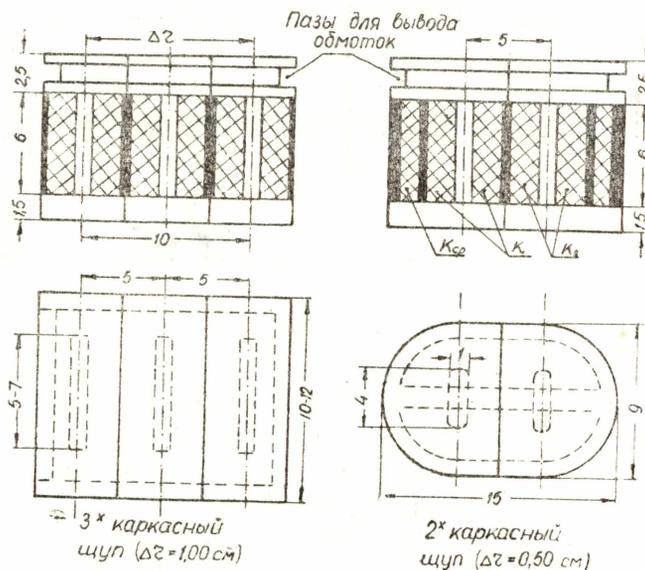


Рис. 3

Для придания монолитности магнитным щупам, поскольку незначительные сдвиги одной катушки относительно другой могут привести к серьезным искажениям результатов измерения  $n$ , щупы пропитываются битумом или пиццеином.

Применение  $n$ -метров, основанных на методе сравнения, позволило значительно увеличить скорость и точность измерения показателя спада магнитного поля по сравнению с косвенными методами определения  $n$ . Кроме того, применение этих приборов полностью освободило от дополнительных трудоемких графоаналитических вычислений.

Скорость измерения  $n$  методом сравнения увеличивается в десятки и более раз, при этом, чем больше радиус, на котором производятся измерения, тем больше относительная скорость определения показателя спада магнитного поля.

В качестве примера на рис. 4 приведена топография магнитного поля в рабочей зоне бетатрона на  $15$  Мэв ( $r_0 = 13$  см), полученная с помощью  $n$ -метра в течение одного часа. При этом измерение показателя спада магнитного поля проводилось по радиусу и в разных плоскостях через каждые  $5$  мм.

Точность измерения показателя спада магнитного поля  $n$ -метром увеличивается как за счет одновременного измерения разности напряжений крайними катушками, так и за счет строго фиксированного расстояния между центрами крайних катушек магнитного щупа. Наглядно это видно по характеру разброса точек, получаемых при определении показателя спада поля  $n$  каким-либо косвенным методом и с помощью  $n$ -метра.

Пределы возможного измерения показателя спада магнитного поля  $n$ -метром зависят от напряженности магнитного поля, расстояния  $\Delta r$ , максимального радиуса, на котором производится измерение  $n$ , и от чувствительности измерительного прибора. Зная эффективное сечение крайних катушек, расстояние между их центрами и чувствительность прибора, нетрудно определить границы возможного измерения  $n$  прибором (напря-

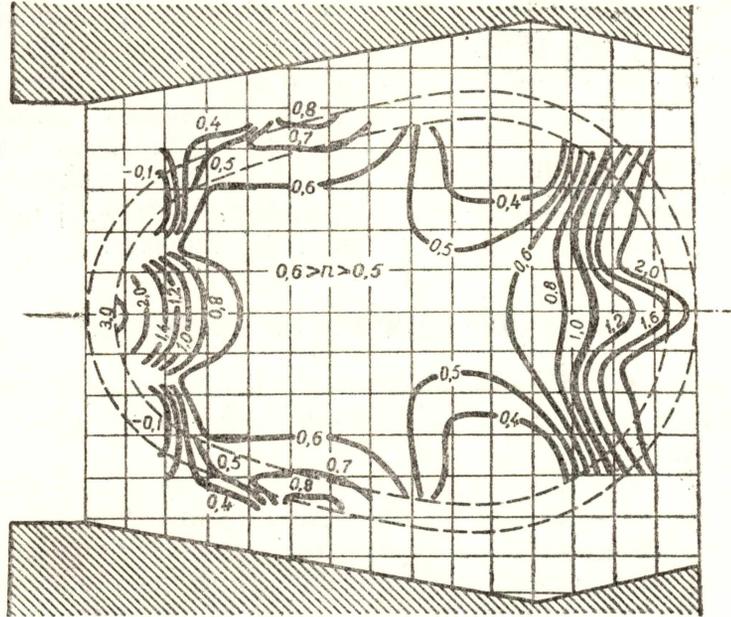


Рис. 4

женность поля и радиус). Практически, если пользоваться чувствительным вольтметром, например, марки ЛВ-9 или еще лучше марки „*Vilnes*“ (Чехословакия), то можно измерять показатель спада магнитного поля в ускорителях с радиусами более 10 метров.

### Нулевой метод

Нулевые  $n$ -метры для измерения показателя спада магнитного поля основаны на том, что от средней катушки напряжение  $U_2$  уменьшается в  $r$  раз делителем напряжения II и  $R_r$  — потенциометром, а  $n$  — потенциометром изменяется  $U_2/r$  так, чтобы

$$\frac{U_2}{r} \cdot n = U_3 - U_1 = \Delta U. \quad (7)$$

Схема для измерения  $n$  нулевым методом приведена на рис. 5. Равенство (7) определяется нулевым прибором, в качестве которого можно использовать вольтметр, катодный осциллограф и др. При  $\Delta r = 1,00$  см показатель спада магнитного поля может быть измерен только от 0 до +1. Для измерения  $n$  больше единицы в цепь двух встречноключенных катушек добавляется делитель напряжения III с коэффициентом деления 10. В этом случае можно производить измерения  $n$  от 0 до 10. Для измерения отрицательных значений показателя спада магнитного поля предусматривается переключатель направления тока от средней или от двух крайних катушек.

Выбор элементов схемы прибора и конструкция магнитного щупа должны удовлетворять тем же требованиям, что и в схеме прибора, основанном на методе сравнения. Однако градуировка этого прибора требует большой точности. Наличие нескольких делителей приводит к необходимости весьма тщательного расчета схемы прибора.

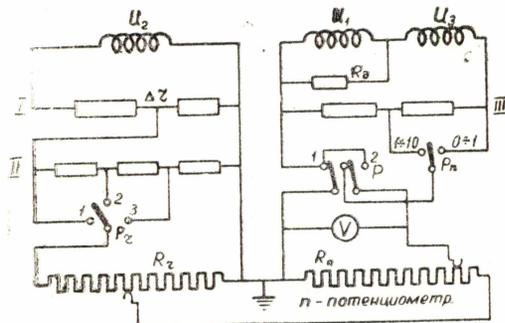


Рис. 5

Ввиду того, что градуировка потенциометра  $R_r$  должна иметь шкалу, обратно пропорциональную  $r$ , применяется не одна шкала, а несколько. Это зависит от наибольшего радиуса, на который рассчитан  $n$ -метр. Каждому диапазону радиусов ставится дополнительный делитель напряжения, рассчитанный с учетом влияния  $R_r$  и  $n$ -потенциометра, вносимого в элементы делителя.

### Порядок измерения прибором

1. Переключатель делителя II устанавливается в положение, соответствующее диапазону радиусов, на которых измеряется показатель спада магнитного поля.

2. Движок  $R_r$ -потенциометра устанавливается в положение, соответствующее радиусу, на котором расположен магнитный щуп.

3. Движок  $n$ -потенциометра выводится в такое положение, при котором нулевой прибор должен показать ноль, практически, минимум за счет наличия сдвига по фазе между напряжениями крайних катушек.

При измерении показателя спада магнитного поля при однонаправленном импульсном питании электромагнита в качестве нулевого прибора по напряжению необходимо применять катодный осциллограф.

Кстати заметим, что основным преимуществом нулевого  $n$ -метра является возможность измерения показателя спада магнитного поля при импульсном режиме работы установки в широком диапазоне частот, в то время, как все косвенные методы определения  $n$  и метод сравнения при непосредственном измерении показателя спада поля  $n$ -метром в этом режиме работы ускорителей обладают недопустимой погрешностью.

В результате проверки и испытания приборов  $n$ -метров, нашедших применение в лаборатории Томского политехнического института, рекомендуется для избежания сложной настройки  $n$ -метров и уменьшения погрешностей при измерении показателя спада магнитного поля следующее:

- 1) учитывать  $\Delta r$ , не равное единице, не дополнительным делителем напряжения, а изменением эффективного сечения средней катушки при изготовлении магнитного щупа,
- 2) стремиться, чтобы погрешности, вносимые при измерении части напряжения от средней катушки и разности напряжений от крайних катушек магнитного щупа, мало отличались друг от друга,
- 3)  $n$ -метр для измерения показателя спада магнитного поля в импульсном режиме рассчитывать для определенной области радиусов с тем, чтобы не ставить дополнительного делителя напряжения II.

При измерении показателя спада магнитного поля указанными приборами практически не учитывается влияние радиальной фазовой неоднородности магнитного поля и насыщение полюсов, хотя, как известно [1, 2], эти влияния могут быть весьма серьезными, особенно в больших ускорителях.

Так, с учетом сдвига по фазе выражение для мгновенного значения показателя спада магнитного поля можно записать в виде:

$$n_t = \frac{\Delta U_{t\varphi}}{U_t} \cdot \frac{r}{\Delta r}, \quad (8)$$

где  $\Delta U_{t\varphi}$  — мгновенное значение разности напряжений с учетом сдвига по фазе потоков между центрами крайних катушек,

$U_t$  — мгновенное значение напряжения средней катушки. Полагая, что сдвиг по фазе  $\Delta\varphi$  на участке  $\Delta r$  является величиной постоянной, не зависящей от амплитудного значения индукции магнитного поля, для малых углов сдвига по фазе, значение  $\Delta U_{t\varphi}$  можно представить как:

$$\Delta U_{t\varphi} = U_1 \cos \omega t - U_3 \cdot \cos(\omega t - \Delta\varphi) = (U_1 - U_3) \cos \omega t - U_3 \sin \omega t \cdot \Delta\varphi \quad (9)$$

Среднее значение напряжения за четверть периода

$$\begin{aligned} \Delta U_{cp} &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \Delta U_{t\varphi} d\omega t = -\frac{2}{\pi} (U_1 - U_3) + \frac{2}{\pi} U_3 \cdot \Delta\varphi = \\ &= \frac{2}{\pi} (U_3 \cdot \Delta\varphi - \Delta U). \end{aligned} \quad (10)$$

Так как ламповый вольтметр отградуирован на эффективное значение, то

$$\Delta U_{эф} = \frac{\Delta U_{cp} \cdot \pi}{2\sqrt{2}} = \frac{-\Delta U + U_3 \cdot \Delta\varphi}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

и, следовательно,

$$n_{cp} = \frac{\sqrt{2} \cdot \Delta U_{эф}}{U_{2max}} \cdot \frac{r}{\Delta r} = \frac{-\Delta U + U_3 \cdot \Delta\varphi}{U_{2max}} \cdot \frac{r}{\Delta r}. \quad (12)$$

Таким образом, показание  $n$ -метра изменяется за счет радиальной фазовой неоднородности на участке  $\Delta r$  на величину

$$n_\varphi = \frac{U_3 \cdot \Delta\varphi}{\Delta r} \cdot \frac{r}{U_2}. \quad (13)$$

Для оценки вносимой погрешности найдем отношение

$$\frac{n_\varphi}{n_c} = \frac{U_3 \cdot \Delta\varphi \cdot r}{U_2 \cdot \Delta r} \cdot \frac{U_2 \cdot \Delta r}{\Delta U \cdot r} = \frac{U_3 \cdot \Delta\varphi}{\Delta U}. \quad (14)$$

Полагая, что  $U_3$  мало отличается от  $U_2$ , из выражения (2), не учитывающего сдвига по фазе между напряжениями в крайних катушках, найдем

$$\frac{\Delta U}{U_3} \approx \frac{\Delta U}{U_2} = \frac{n_c \cdot \Delta r}{r}. \quad (15)$$

Из уравнений (14) и (15)

$$\frac{n_\varphi}{n_c} = \frac{r}{n_c} \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta r} \cdot 100\%. \quad (16)$$

На основании экспериментальных данных по измерению радиальной фазовой неоднородности магнитного поля известно, что  $\Delta\varphi/\Delta r$  в рабочей зоне ускорения бетатронов и синхротронов не превышает  $0,2 - 0,3$  мксек/см или  $(0,2 - 0,3) \pi \cdot 10^{-4}$  см<sup>-1</sup>. Следовательно,

$$\frac{n_\varphi}{n_c} < 0,3\pi \frac{r}{n_c} \cdot 10^{-4}. \quad (17)$$

Например, для бетатрона с  $r_0 = 50$  см, где  $n = 0,6$  и  $r = 52$  см,  $n_\phi$  составляет менее 0,8% от  $n_c$ .

Чем больше ширина рабочей зоны ускорения, тем меньше  $\Delta\phi/\Delta r$ , и поэтому даже в ускорителях с радиусами несколько метров практически можно считать, что сдвиг по фазе потоков в крайних катушках магнитного щупа не влияет на показание  $n$ -метра (в пределах чувствительности прибора до 1—2%).

Итак, если в качестве измерительного прибора  $n$ -метров является ламповый вольтметр, то определяется некоторое „среднее“ значение показателя спада магнитного поля, близкое к статическому —  $n_c$ .

При применении катодного осциллографа, строго говоря, производится измерение не  $n$ , а некоторой другой величины (фиктивного  $n$ , которое обозначим  $n'$ ), поскольку

$$n' = - \frac{\Delta U_z}{U_z} \cdot \frac{r}{\Delta r} = - \frac{\Delta \dot{H}_z}{\dot{H}_z \Delta r} \cdot \frac{r}{\Delta r} \quad (18)$$

Так как в начале роста поля при непрерывном режиме питания электромагнита (практически и при импульсном питании) достаточно справедливо равенство

$$\frac{\Delta \dot{H}_z}{\dot{H}_z} = \frac{\Delta H_z}{H_z} \quad (19)$$

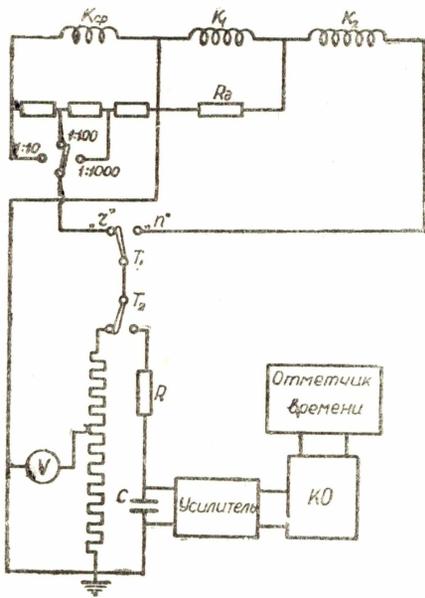


Рис. 6

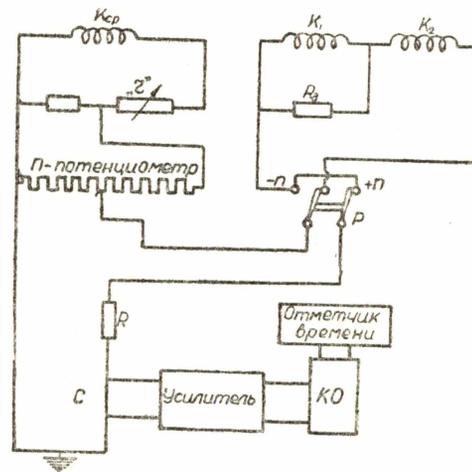


Рис. 7

то измерение показателя спада магнитного поля может производиться без большой погрешности и с помощью катодного осциллографа.

Для измерения показателя спада магнитного поля с учетом влияния насыщения полюсных корректирующих зубцов и радиальной фазовой неоднородности нами разработаны специальные схемы  $n$ -метров.

На рис. 6 представлена схема  $n$ -метра, основанного на методе сравнения. Эта схема позволяет измерять  $n$  в начале роста магнитного поля без влияния радиальной фазовой неоднородности и в конце его, но уже с полным учетом влияния насыщения полюсов. Обозначенный на рис. 6 пунктиром усилитель не обязателен, но применяется при слабых сигналах напряжения на выходе интегратора. Отметчик времени может быть применен для точного определения момента времени, соответствующего фазе магнитного поля  $90^\circ$  [1].

Видоизмененная схема нулевого  $n$ -метра (рис. 7), т. е. с добавлением интегратора с усилителем и отметчика времени, позволяет измерять показате-

тель спадания магнитного поля как в непрерывном, так и при импульсном питании электромагнита в любой момент времени с учетом влияния радиальной фазовой неоднородности и насыщения полюсов.

Схема отметчика времени является одной из разновидностей обычных реактивных пусковых схем с катодной связью. В качестве датчика схемы служит пермаллоивый пикер, помещенный в магнитное поле установки на радиус равновесной орбиты.

В заключение отметим, что разобранные выше  $n$ -метры с малообъемными измерительными щупами позволяют достаточно просто и с большой точностью производить ряд экспериментов, связанных с изучением влияния на конфигурацию магнитного поля расположения различных токонесущих обмоток, магнитных шунтов, сильфонов, стальных камер и т. п.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лещенко И. Г., Расчет, сооружение и экспериментальное исследование электромагнита бетатрона на 100 Мэв. Кандидатская диссертация, ТПИ, 1955.
  2. Blewett M. H., Eddy—Current Phenomena in the Cosmotron, Rev. Sei. Instr., 24, 9, 1953.
-