

## ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ СПАДАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В БЕТАТРОНАХ

А. Е. КАЗАК, Е. Г. КАДЛУБОВИЧ, Г. А. КУНИЦЫН, И. Г. ЛЕЩЕНКО

(Представлена научным семинаром НИИ ЭИ и кафедры ИИТ АВТФ)

При настройке электромагнитов бетатронов и синхротронов большое значение уделяется измерению показателя спада магнитного поля  $n$ , который определяется выражением

$$n = \frac{\Delta H}{\Delta r} \cdot \frac{r}{H},$$

где  $\frac{\Delta H}{\Delta r}$  — скорость спада магнитного поля на радиусе от центра ускорителя,

$H$  — напряженность магнитного поля на том же радиусе.

Существуют различные способы косвенного и непосредственного измерения среднего и мгновенного значений показателя спада магнитного поля [1]. Известно, что косвенные методы определения  $n$  по экспериментально снятой зависимости  $H = f(r)$  трудоемки и обладают сравнительно большой погрешностью в ускорителях с большими радиусами орбиты.

Точнее и намного производительнее являются методы непосредственного измерения показателя спада магнитного поля, основанные на измерении датчиками поля разности напряжений, пропорциональной  $\Delta H$  на участке  $\Delta r$ , и напряжения на радиусе  $r$ , пропорционального  $H$ , с последующими схемными преобразованиями.

Ниже описывается вариант прибора  $n$ -метра для непосредственного измерения как средних, так и мгновенных значений показателя спада магнитного поля.

Блок-схема прибора приведена на рис. 1. В качестве датчика используется щуп, состоящий из трех измерительных катушек, аналогичных ранее описанным в [1].

Измерение основано на применении компенсационной схемы, позволяющей производить операцию деления  $\frac{\Delta U / \Delta r}{U}$ , а радиус поло-

жения центра щупа  $r$  учитывать потенциометром, движок которого связан со щупом и размещен на специальном диске в зазоре электромагнитного ускорителя.

Операция деления осуществляется по схеме, изображенной на рис. 2. Выходными величинами схемы, то есть делимым и делителем, являются приращения величины сопротивлений  $\Delta r$  и  $\Delta R$  плеч  $r_3$  и  $R_3$  неуравновешенных мостов  $M_1$  и  $M_2$ .



В качестве сопротивлений  $r_3$  и  $R_3$  применены термосопротивления с косвенным подогревом ТКП-300, обладающие высокой чувствительностью к мощности рассеивания в подогревателе [3]. Выходной величиной схемы является ток  $I = \frac{\Delta U / \Delta r}{U}$ . С учетом радиуса  $r$  потенциометром  $h_0$  показания измерительного прибора прямо пропорциональны среднему значению показателя спада магнитного поля за период. Подогреватели питаются напряжениями, пропорциональными  $\Delta H$  и  $H$ ,

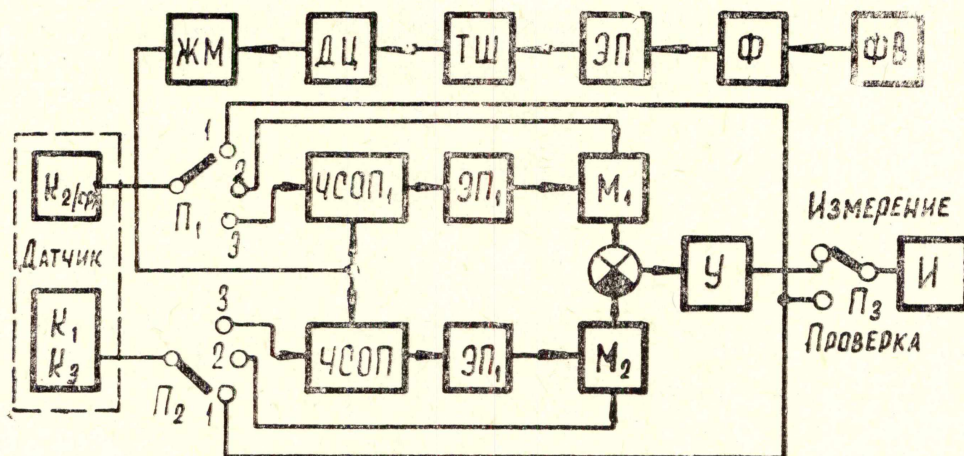


Рис. 1

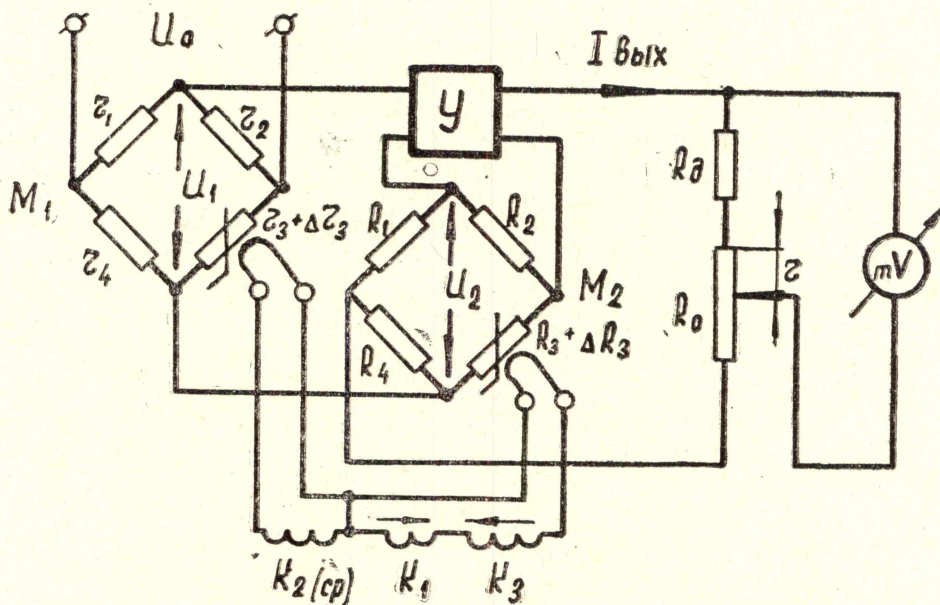


Рис. 2

снимаемыми со щупа. При равновесии моста  $M_1$  выходное напряжение  $U_1$ , равное входному напряжению усилителя, будет равно нулю, прибор покажет нулевое значение тока. В результате разбаланса моста  $M_1$  на выходе его появится напряжение

$$U_1 = U_0 \cdot \frac{\Delta r}{4 \cdot r}, \quad (2)$$

где  $U_0$  — напряжение питания моста  $M_1$ .



Выходное напряжение усиливается усилителем и подается на вход второго моста. Разбаланс второго моста компенсируется с разбалансом первого моста до полной компенсации

$$U_2 = \frac{I \cdot \Delta R}{4}, \quad (3)$$

в идеальном случае  $U_1 = U_2$ ,

$$U_0 = \frac{\Delta r}{4 \cdot r} = I \cdot \frac{\Delta R}{4},$$

отсюда

$$I_{\text{вых.1}} = \frac{1}{r} \cdot U_0 \cdot \frac{\Delta r}{\Delta R}. \quad (4)$$

При  $U_1 \neq U_2$  относительная некомпенсация

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} = \frac{1}{1 + K \cdot \beta}. \quad (5)$$

Подставляем сюда значения  $U_1$  и  $U_2$

$$\frac{1}{1 + K \cdot \beta} = 1 - \frac{I \cdot r \cdot \Delta R}{U_0 \cdot \Delta r},$$

отсюда

$$I_{\text{вых.2}} = \frac{K \cdot \beta \cdot U_0 \cdot \Delta r}{r \cdot \Delta R \cdot (1 + K \cdot \beta)}. \quad (6)$$

Выходное напряжение второго моста

$$U_2 = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot U_{\text{вых.ус}};$$

$$\beta = \frac{U_2}{U_{\text{вых.ус}}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R}. \quad (7)$$

Подставим значение  $\beta$  в выходной ток

$$I_{\text{вых.2}} = \frac{K \cdot \Delta r \cdot U_0}{r \cdot (4R + K \cdot \Delta R)}. \quad (8)$$

Задаваясь величиной относительной недокомпенсации, можно определить коэффициент усиления усилителя  $K$

$$a = \frac{I_{\text{вых.1}} - I_{\text{вых.2}}}{I_{\text{вых.1}}} = \frac{4R}{4R + K \cdot \Delta R},$$

отсюда

$$K = \frac{4 \cdot R (1 - a)}{\Delta R}. \quad (9)$$

Для выбранных параметров термисторов ТКП-300 и относительной недокомпенсации 0,001 коэффициент усиления усилителя равен 5000. Усилитель выполнен 3-каскадным, на транзисторах.

Напряжение на выходе потенциометра равно

$$U_{\text{вых}} = K \cdot \frac{\Delta U / \Delta r}{U} \cdot r, \quad (10)$$

т. е. напряжение на выходе пропорционально  $n = n = \frac{\Delta U \cdot r}{U \cdot \Delta r}$  (показателю спада магнитного поля). Движок потенциометра жестко связан



с ползуном, в который вставляется датчик при измерениях. Сам потенциометр расположен на измерительном диске вдоль радиуса воздушного зазора электромагнита.

В качестве регистрирующего устройства прибора, обеспечивающего наибольшую точность измерения, применяется ламповый милливольтметр типа ВЗ-7, который подключается при измерениях к специальным клеммам на лицевой панели прибора. При этом предварительно производится градуировка шкалы милливольтметра непосредственно в  $n$ .

Для измерения мгновенных значений показателя спада магнитного поля применяется устройство, блок-схема которого изображена на рис. 1. При помощи фазовращателя производится смещение синусоиды от 0 до 90°. Фильтр служит для сохранения формы синусоиды. Для увеличения стабильности работы и уменьшения уровня помех на входе прибора применен эмиттерный повторитель ЭП. Триггер Шмитта ТШ используется для формирования прямоугольных импульсов.

Дифференцирующая цепочка ДЦ преобразует эти импульсы в спусковые, которые запускают одновибратор. С выхода ждущего мультивибратора ЖМ отрицательные импульсы длительностью порядка микросекунд подаются на четырехдиодные схемы отбора проб ЧСОП<sub>1</sub> и ЧСОП<sub>2</sub> и открывают диоды в течение этих микросекунд. В течение времени действия импульсов диоды открыты и конденсаторы на выходе (рис. 3) заряжаются до соответствующих мгновенных значений измеряемых напряжений, которые подаются от преобразователя Д [4].

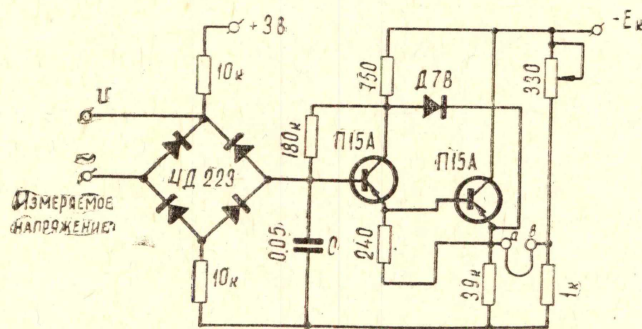


Рис. 3

Чтобы для определения  $n$  использовать схему, которая применялась для измерения средних значений, необходимо эти импульсы, пропорциональные мгновенным значениям измеряемых напряжений, подать на плечи мостов  $M_1$  и  $M_2$ .

Но так как постоянные времени подогревных термосопротивлений порядка 13,5 сек, необходимо короткие импульсы от одновибратора преобразовать в широкие. Это можно обеспечить увеличением постоянного разряда конденсаторов. Для этого ставятся эмиттерные повторители ЭП<sub>1</sub> и на составных триодах.

Если смещать синусоиду от 0° до 90°, то тем самым смещается импульс, который на время, равное его длительности (порядка микросекунд), открывает схемы отбора проб. На выходе получают напряжения, пропорциональные мгновенным значениям  $dU$  и  $U$ , поступающим с датчика. При положении «проверка» переключателя  $П_3$  и положении  $I$  переключателей  $П_1$  и  $П_2$  поочередно проверяются напряжения  $\Delta U$  и  $U$  датчика. При положении «измерение» переключателя  $П_3$  производятся измерения средних и мгновенных значений. При измерении



средних значений переключатели  $P_1$  и  $P_2$  одновременно ставятся в положение 2, для мгновенных — в положение 3.

Погрешность измерения среднего значения показателя спада магнитного поля полностью зависит от погрешности лампового милливольтметра, используемого в качестве выходного прибора, погрешности электронной схемы и датчика

$$\delta = \delta_{л.в} + \delta_{эл.сх} + \delta_{д.}$$

Погрешность измерения лампового милливольтметра составляет 1,5%.

Погрешности за счет изменения температуры окружающей среды на измерении не скажутся, так как изменения сопротивлений термисторов  $\Delta r$  и  $\Delta R$  в одинаковой степени зависят от температуры и в результате деления устраняется зависимость выходной величины от температуры.

Погрешность электронной схемы задается при определении коэффициента усиления усилителя через величину относительной некомпенсации. Для данного прибора  $\delta_{эл.сх} = 0,2\%$ . Погрешность датчика можно разделить на следующие группы:

а) погрешность за счет возможной неправильной установки катушек по радиусу;

б) погрешность за счет возможного перекоса катушек;

в) температурная погрешность.

Первая погрешность определяется по формуле [1]

$$\frac{\Delta n}{n} = 1 - \left( \frac{r + \Delta r}{r} \right)^{1-n},$$

где  $\Delta r$  — смещение катушки по радиусу.

При смещении датчика на 0,5 мм на радиусе равновесной орбиты ( $r = 24,5$  см), где действительное  $n = 0,062$ , измерение дает относительную ошибку 0,2%.

Погрешность, возникающая за счет перекоса катушек, равна

$$\frac{\Delta h}{n} = 1 - \frac{1}{\cos \alpha},$$

где  $\alpha$  — угол отклонения.

При  $\alpha = 2^\circ$  погрешность равна 0,5%.

Температурная погрешность имеет место при нагревании измерительного щупа в зазоре электромагнита и подсчитывается по формуле

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{\Delta R}{R_n + R_k + \Delta R_k}.$$

Здесь  $\Delta R_k = R_{k20^\circ} \cdot \alpha' \cdot \Delta T$  — увеличение сопротивления катушки с ростом температуры,  $\alpha'$  — средний температурный коэффициент (для меди 0,00393);

$R_{k20^\circ}$  — сопротивление измерительной катушки при 20°C.

Для используемого в данном приборе датчика при увеличении температуры на 1°C погрешность составила 0,13%. Если при передвижении датчика из одной точки в другую напряжение сети изменится на 1%, то это приведет к погрешности отсчета, равной также 1% [1]. Поэтому при измерениях необходимо соблюдать условие стабильности напряжения сети (0,05 ÷ 0,01%). В этом случае полная максимальная погрешность будет порядка 2%.

Погрешностью электронной схемы, которая применяется для измерения мгновенных значений показателя спада магнитного поля, можно пренебречь. Импульсы, заряжающие конденсаторы в ЧСОП<sub>1</sub> и ЧСОП<sub>2</sub>, следуют с интервалом 0,02 сек. За счет эмиттерных повторителей с большими входными сопротивлениями постоянные разряда рав-



ны  $\tau = 0,082$  сек, т. е. конденсаторы не успеют зарядиться за интервал следования импульсов.

Сопротивление термистора будет поддерживаться постоянным при выбранном мгновенном значении напряжения, если даже допустить погрешность электронной схемы до 5%, то есть  $\tau = 0,082 \pm 0,0041$  сек.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Г. Лещенко. Разработка методики измерения магнитных полей в ускорителях. Труды ТПИ, 1956.
  2. П. П. Орнатский. Автоматические измерительные приборы. Изд-во «Техника», 1965.
  3. В. Ю. Лавриненко. Справочник по полупроводниковым приборам. Изд-во «Техника», 1964.
  4. Г. Парtridge. Электронные измерительные приборы. Госэнергоиздат, 1961.
-