

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 ΔH на участке Δr , 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 $\frac{\Delta U_i \Delta r}{U}$, 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 Δr и ΔR 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 ΔH и H ,

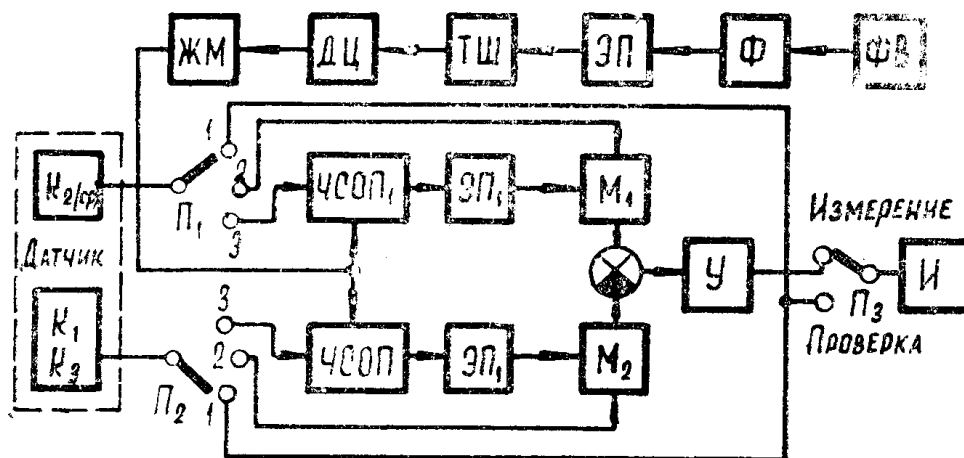


Рис. 1

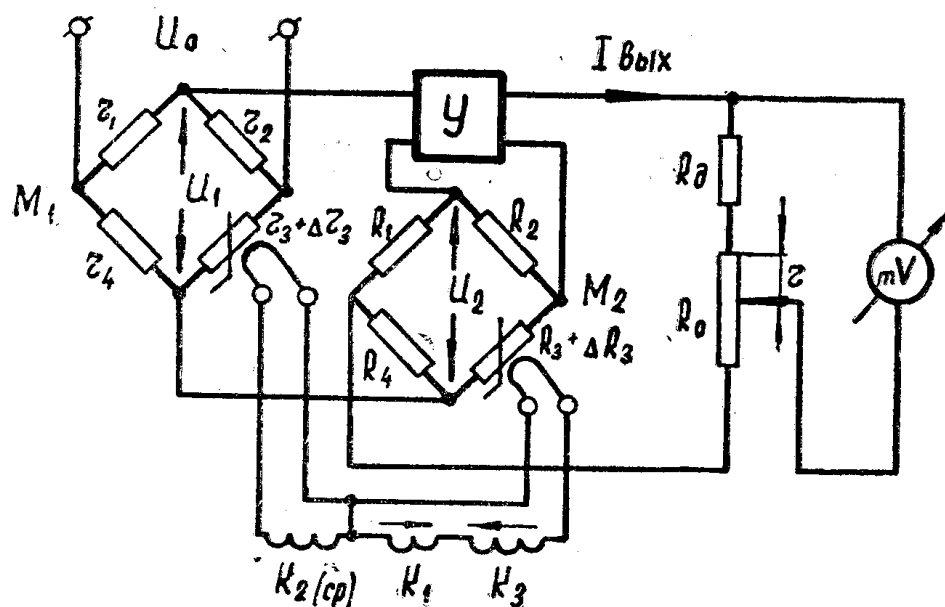


Рис. 2

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 β 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 спадания 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 ЧСОП₁ и ЧСОП₂ 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].

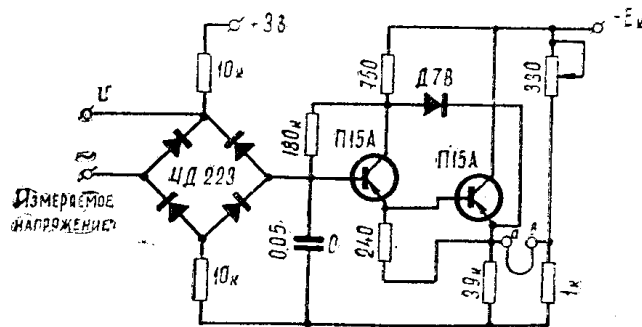


Рис. 3

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 ЭП₁ 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 P_3 и положении I переключателей P_1 и P_2 поочередно проверяются напряжения ΔU и U датчика. При положении «измерение» переключателя P_3 производятся измерения средних и мгновенных значений. При измерении

средних значений переключатели Π_1 и Π_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 Δr и ΔR 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 Δr — 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 α — 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, α' — средний температурный коэффициент (для меди 0,00393);

R_{k20° — 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 ЧСОП₁ и ЧСОП₂, 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. Партридж. Электронные измерительные приборы. Госэнергоиздат, 1961.
-