

## ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТОКОВ В ДАТЧИКАХ ПЕРМАЛЛОЕВОГО МАГНИТОМЕТРА

Б. Н. КАЛИНИН

Для измерения распределения мгновенных значений переменных магнитных полей в электромагнитах ускорителей применяется пермаллоевый магнитометр [1, 2]. Полная погрешность измерений не должна превышать 0,01 ÷ 0,1 %. Существенную погрешность в измерения поля пермаллоевым магнитометром может внести погрешность определения отношения постоянных токов в обмотках подмагничивания

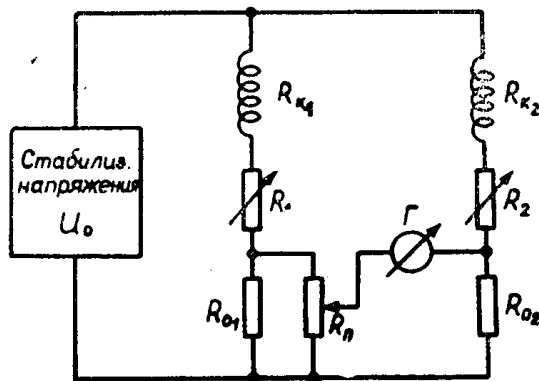


Рис. 1. Принципиальная схема для измерения отношения токов стабилизатором напряжения

измерительного датчика и датчика уровня поля. Требования к одновременной нестабильности токов в обмотках подмагничивания датчиков могут быть снижены в 10—100 раз, так как совместное изменение токов приведет лишь к изменению уровня поля. Характер распределения поля в электромагнитах ускорителей слабо зависит от уровня измеряемого поля. Относительное изменение уровня поля на  $\delta H$  приводит к погрешности в определении искажений поля

$$\Delta H = H_{и} \delta H, \quad (1)$$

где  $H_{и}$  — искажение поля из-за вихревых токов, остаточного поля и конечного значения магнитной проницаемости стали.

В [2] описана схема для измерения отношений токов в обмотках подмагничивания датчиков пермаллоевого магнитометра, использующая один источник стабилизированного напряжения (рис. 1).

Как показывает анализ, эта схема обладает тем существенным недостатком, что температурные изменения сопротивления обмоток датчиков приводят к значительной погрешности измерения отношения токов:

$$\delta \left( \frac{I_1}{I_2} \right) = \gamma I \frac{R_{к}}{U_0} \Delta T, \quad (2)$$

где  $\gamma$  — температурный коэффициент сопротивления обмотки датчика,  
 $I$  — ток в обмотке датчика,  
 $R_k$  — сопротивление обмотки датчика,  
 $U_0$  — стабилизированное напряжение источника питания,  
 $\Delta T$  — разность температур обмоток датчиков измерительного и уровня поля.

Например, при  $I = 0,1$  а,  $R_k = 100$  ом,  $U_0 = 400$  в,  $\gamma = 0,0041/град$  С,  $\Delta T = 30^\circ$ С погрешность измерения составляет 0,3 %.

Для измерения отношения токов в датчиках пермаллового магнитометра может быть использована схема с питанием каждого датчика от отдельного регулируемого стабилизатора постоянного тока. В этом случае требуется два стабилизатора тока с нестабильностью до 0,005 %, что усложняет схему в целом.

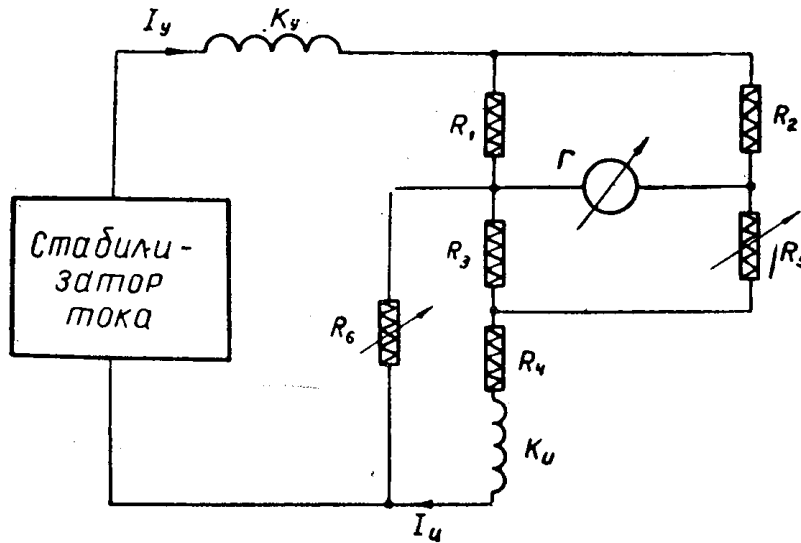


Рис. 2. Принципиальная схема для измерения отношения токов со стабилизатором тока

Нами предложена схема (рис. 2), которая позволяет измерять отношение токов в датчиках пермаллового магнитометра с погрешностью до 0,01 %. В этой схеме используется один регулируемый стабилизатор тока с нестабильностью 0,5 ÷ 1,0 %. Обмотки подмагничивания обоих датчиков  $K_u$  и  $K_y$  соединены последовательно. Ток  $I_u$  в обмотке измерительного датчика регулируется шунтирующим магазином  $R_6$ . Магазином сопротивлений  $R_5$  устанавливается равновесие моста, образованного сопротивлениями  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_5$ . Отношение токов при этом пропорционально величине установленного сопротивления магазина  $R_5$ :

$$\frac{I_u}{I_y} = R_5 \frac{R_1}{R_2 R_3} \quad (3)$$

Погрешность измерения, равную разности отношения токов, полученных по формуле (3), и истинного отношения токов, можно подразделить на схемную обусловленную тем, что отношение токов не точно пропорционально  $R_5$  из-за шунтирования  $R_1$  сопротивлением  $R_2$ , температурную — обусловленную температурным изменением сопротивления обмотки измерительного датчика и погрешность магазина сопротивлений  $R_5$ .

Решив систему контурных токов (рис. 2) при условии равновесия моста, получим отношение токов в обмотках датчиков:

$$\frac{I_{\text{и}}}{I_{\text{у}}} = \frac{R_1}{R_3} \cdot \frac{R_5^2 a + R_5 b + c}{R_5 d + f}, \quad (4)$$

где  $a = (R_3 + R_4)(R_2 + R_2 + R_{\Gamma})$ ;

$b = (R_3 + R_4)[(R_1 + R_2)(R_3 + R_{\Gamma}) + R_3 R_{\Gamma}] + R_3 R_4 (R_1 + R_2 + R_{\Gamma})$ ;

$c = R_3 R_4 [(R_1 + R_2)(R_3 + R_{\Gamma}) + R_3 \cdot R_{\Gamma}]$ ;

$d = (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)(R_1 + R_2 + R_{\Gamma})$ ;

$f = R_2 R_3 R_{\Gamma} (R_1 + R_2) + R_4 [(R_1^2 + R_2^2)(R_3 + R_{\Gamma}) + 2R_1 R_2 R_3 +$   
 $+ R_{\Gamma}(R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3)].$

Если принять  $R_4 = R_{\Gamma} = 0$ , то из (4) получим

$$\frac{I_{\text{и}}}{I_{\text{у}}} = \frac{R_1}{R_3} \cdot \frac{R_5 + R_3}{R_1 + R_2}. \quad (5)$$

Приведенную схемную погрешность измерения отношения токов, определяемую как отношение абсолютной ошибки измерения  $\Delta I_{\text{и}}$  к току  $I_{\text{у}}$  в обмотке датчика уровня поля, можно записать в виде

$$\frac{\Delta I_{\text{и}}}{I_{\text{у}}} = \frac{R_5}{R_{5\text{max}}} - \frac{I_{\text{и}}}{I_{\text{у}}}, \quad (6)$$

где  $R_{5\text{max}}$  — максимальное значение  $R_5$ . Подставляя (5) в (6) и имея в виду равенство  $R_1 R_{5\text{max}} = R_2 R_3$ , получим

$$\frac{\Delta I_{\text{и}}}{I_{\text{у}}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \left( \frac{R_5}{R_{5\text{max}}} - 1 \right) \approx \frac{R_1}{R_2} \left( \frac{R_5}{R_{5\text{max}}} - 1 \right). \quad (7)$$

Как следует из (7), приведенная схемная погрешность линейно увеличивается от 0 (при  $R_5 = R_{5\text{max}}$ ) до  $R_1/R_2$  (при  $R_5 = 0$ ). Для уменьшения схемной погрешности необходимо уменьшать отношение  $R_1/R_2$ .

Следует отметить, что в данной схеме ток в обмотке измерительного датчика всегда меньше тока в обмотке датчика уровня поля. Поэтому для измерения магнитных полей, больших по величине, чем уровень поля, необходимо, чтобы постоянная обмотки подмагничивания измерительного датчика была больше постоянной датчика уровня поля. Отношение магнитных полей в местах расположения датчиков измерительного и уровня поля равно

$$\frac{H_{\text{и}}}{H_{\text{у}}} = \frac{I_{\text{и}} q_{\text{и}}}{I_{\text{у}} q_{\text{у}}}, \quad (8)$$

где  $q_{\text{и}}$  и  $q_{\text{у}}$  — постоянные подмагничивания соответственно измерительного датчика и датчика уровня поля. Приведенную погрешность измерения отношения магнитных полей, имея в виду (6) и (8), можно записать в виде

$$\frac{\Delta H_{\text{и}}}{H_{\text{у}}} = \frac{q_{\text{и}}}{q_{\text{у}}} \left( \frac{q_5}{R_{5\text{max}}} - 1 \right). \quad (9)$$

Постоянная гальванометра по току должна быть не менее

$$\Delta I_{\Gamma} = I_{\text{у min}} \frac{R_1 R_{5\text{max}}^2 \delta R_{5\text{min}}}{(R_{5\text{max}} + R_{\Gamma})^2 R_2} \approx H_{\text{у min}} \frac{R_1}{q_{\text{у}} R_2} \delta R_{5\text{min}}, \quad (10)$$

где  $H_{y\min}$  — минимальное значение уровня измеряемого поля, которое можно измерить с приведенной схемой погрешностью не выше  $R_1/R_2$ ;  
 $\delta R_{5\min} = \Delta R_5/R_{5\max}$  — допустимая погрешность отсчета отношения токов, равная минимальному значению ступени  $R_3$ , отнесенная к максимальному значению  $R_3 = R_{5\max}$ .

Температурную погрешность измерения можно определить из выражения (4), как разность отношений токов при температуре обмотки измерительного датчика  $T_0$  и  $T_0 + \Delta T$ .

В качестве примера приведен расчет схемой и температурой погрешностей измерения отношения токов при  $R_1 = R_3 = 10 \text{ ом}$ ,  $R_2 = 100 \text{ ком}$ ,  $R_4 = 100 \text{ ом}$ ,  $R_{5\max} = 100 \text{ ком}$ ,  $R_r = 10 \text{ ком}$ ,  $\Delta I_r = 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ а/деление}$ ,  $I_{y\min} = 0,2 \text{ а}$ ,  $\delta R_{5\min} = 1 \cdot 10^{-4}$  и  $\Delta T = 30^\circ \text{ С}$ . Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	$R_5, \text{ ом}$	$\frac{I_H}{I_Y}$	Приведенная схемная погрешность $\Delta I_H/I_Y, \%$		Приведенная температурная погрешность $\Delta I_H/I_Y, \%$
			по формулам (4), (6)	по формуле (7)	
1	0	0	$-9 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
2	$1 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^{-4}$	$-9,1 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
3	$1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^{-3}$	$-9,2 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
4	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-2}$	$-1 \cdot 10^{-2}$	$-9,9 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
5	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^{-1}$	$-1,3 \cdot 10^{-2}$	$-9 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
6	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^{-1}$	$-1,28 \cdot 10^{-3}$	$-8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
7	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^{-1}$	$-1,12 \cdot 10^{-2}$	$-5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
8	$8 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^{-1}$	$-9 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-4}$
9	$1 \cdot 10^5$	1,00	$-7,7 \cdot 10^{-3}$	0	$9 \cdot 10^{-4}$

В столбце 4 (табл. 1) приведены результаты расчета приведенной схемной погрешности по точным формулам (4) и (6), а в столбце 5 — по приближенной формуле (7). Как видно из сравнения столбцов 4 и 5, ошибка в определении схемной погрешности по приближенным формулам составляет не более  $7,7 \cdot 10^{-3} \%$ . В столбце 6 дана приведенная температурная погрешность, рассчитанная по формуле (4), при изменении температуры обмотки измерительного датчика на  $30^\circ \text{ С}$ . Температурные изменения сопротивления обмотки датчика уровня поля не приводят к погрешности, так как схема питается от стабилизатора тока. Как видно из табл. 1, приведенная погрешность измерения отношения токов составляет не более  $0,015 \%$ . Выбором отношения  $R_1/R_2$  приведенную схемную погрешность можно свести до  $0,01 \%$ .

### Выводы

Предложенная схема довольно проста и позволяет измерять отношение токов в датчиках пермаллового магнитометра с приведенной погрешностью до  $0,01 \%$ . Питание датчиков осуществляется от одного стабилизатора тока с невысокой стабильностью. Для приближенных расчетов элементов схемы можно пользоваться формулами (3), (7). При соответствующем выборе элементов схемы погрешность измерений определяется лишь погрешностью магазина сопротивлений  $R_5$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. К. Н. Шорин, Ю. Н. Метельников, М. В. Еремин. ПТЭ, № 4, 1958.
2. Г. М. Тумайкин, В. Н. Епонешников, П. П. Красноносеньких. Труды IV Межвузовской конференции по электронным ускорителям. Изд. «Высшая школа», Москва, 1964.