

АКАДЕМИЯ НАУК СССР СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

препринт 258

Н.С.Бабенко

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ
И ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Новосибирск
1968

Н.С.Бабенко

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ И
ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

А Н Н О Т А Ц И Я

Целью работы является обзор наиболее интересных, с точки зрения автора, методов измерения и разработок. Рассмотрены 6 методов измерения: индукционный метод, феррозонда, методы с использованием эффектов Холла, Фарадея, Зеемана и магниторезистивный.

*Мария Николаевна
автор
Н.С. Бабенко*

1. Индукционный метод

Несмотря на то, что в настоящее время нет промышленных разработок аппаратуры, использующей индукционный датчик, для измерения переменных магнитных полей, метод нашел широкое распространение в экспериментальной практике, благодаря своей простоте.

В индукционном методе датчиком является плоская или цилиндрическая катушка, на концах которой в переменном магнитном поле наводится эдс

$$e = - \frac{d\varphi}{dt} = - \mu_0 SW \cos \psi \frac{dH}{dt} [B]$$

где

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [2H/A]$ — проницаемость вакуума,

SW — потокосцепление катушки $[m^2]$,

H — величина напряженности магнитного поля $[A/m]$,

ψ — угол между направлением поля и осью катушки.

В практике измерений достаточно точно $\psi = 0$.

При измерении малых переменных магнитных полей, до 1э, в звуковом диапазоне, для увеличения чувствительности, внутрь катушки помещают ферромагнитный концентратор $[1 - 3]$. В однородном гармоническом магнитном поле $H = H_m e^{-j\omega t}$ в датчике с ферромагнитным сердечником будет наводиться эдс:

$$e = j\omega M H_m e^{-j\omega t}, \text{ где}$$

M — магнитный момент датчика.

Обычно, подобные датчики подключаются к сетке первой лампы усилителя, как показано на рис.1. Амплитуда выходного напряжения такого преобразования будет выражаться формулой:

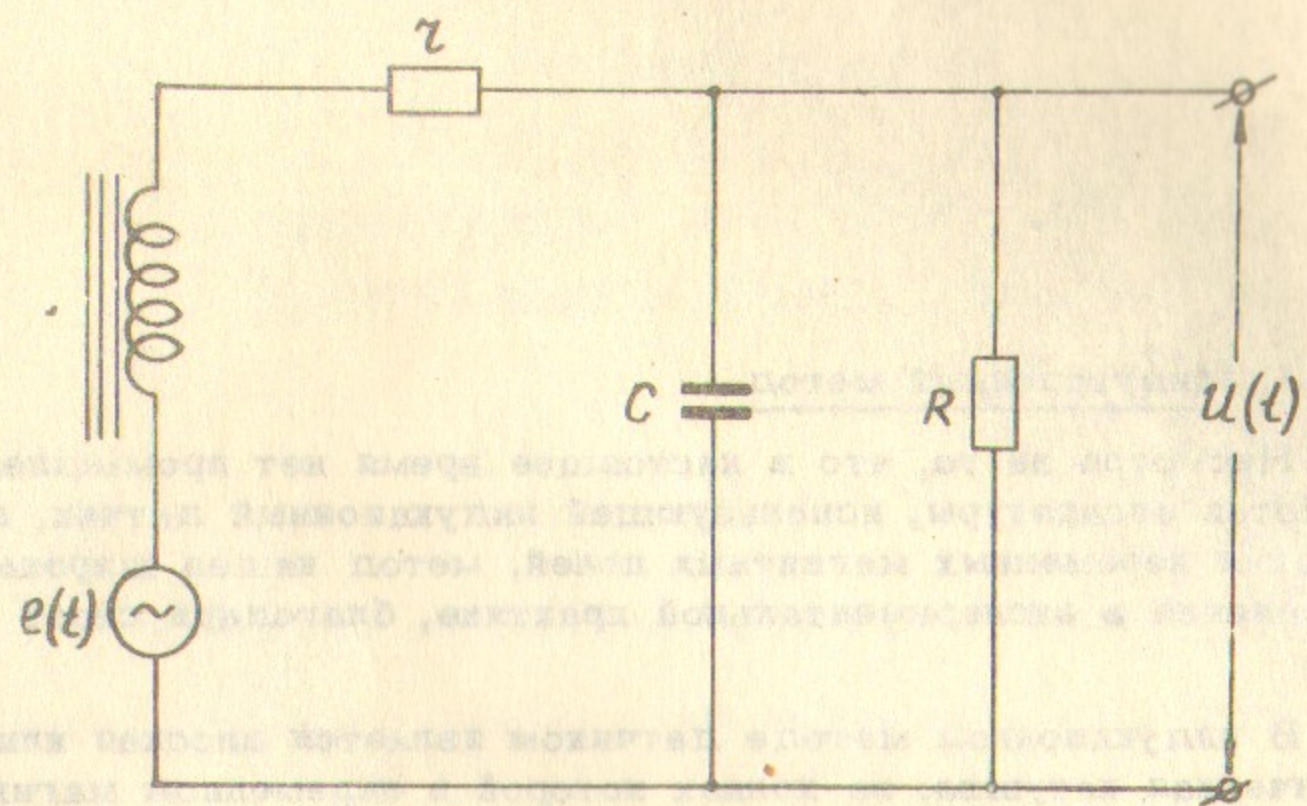


Рис.1

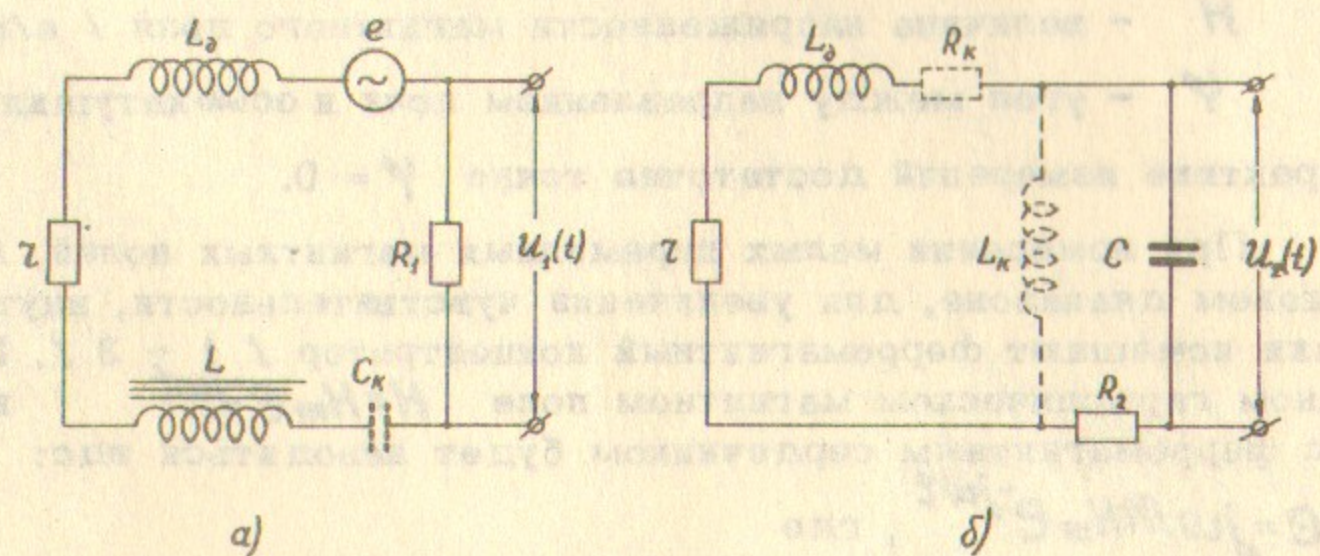


Рис.2

$$U_m = \frac{\omega M H_m}{\sqrt{[1 + z/R - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}]^2 + \omega^2 [Cz + L/R]^2}} \quad [B]$$

где

R - входное сопротивление усилителя / ом /,

C - суммарная ёмкость обмотки C_0 и подводящего кабеля C_x / ф /,

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ - резонансная частота датчика,

z - сопротивление потерь / ом /,

L - индуктивность датчика / гн /,

M - магнитный момент / гн.м /.

Чувствительность такого датчика найдется как отношение $\frac{U_m}{H_m}$:

$$d = \frac{\omega M}{\sqrt{[1 + z/R - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}]^2 + \omega^2 [Cz + L/R]^2}} \quad [a/m]$$

При малой нагрузке R , когда отношение z/R сравнимо с единицей и $Cz \ll L/R$, на низких частотах, $\omega^2 \ll \omega_0^2$,

чувствительность на начальном участке, $\omega \ll (R+z)/L$, будет нарастать линейно с частотой: $d = \omega \frac{MR}{z+R}$ и не зависит от величины индуктивности и ёмкости датчика. В частотном диапазоне

$\omega \gg \frac{R+z}{L}$ и $\omega^2 \ll \omega_0^2$ чувствительность вообще не зависит от частоты $d = MR/L$. На высоких частотах $\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \gg 1 + z/R$

при $\omega \ll \frac{1}{RC}$, чувствительность также не зависит от частоты и выражается той-же формулой. Эти участки используются при работе датчика без интегратора.

Магнитный момент датчика определяется эквивалентной пронизываемостью сердечника. При тонком и длинном стержне для од-

послойной, симметрично посаженной, катушки M находится по формуле:

$$M = \frac{\mu S w}{1 + (0,75 \div 0,9) N_{\text{эз}} (\mu/\mu_0 - 1)} [\text{гн} \cdot \text{м}], \text{ где}$$

μ - проницаемость материала / гн/м /,

$N_{\text{эз}}$ - коэффициент размагничивания эллипсоида, эквивалентного данному цилиндрическому или прямоугольному стержню, его величину можно найти, например, в /4/. Приближенные значения произведения $(0,75 - 0,9) N_{\text{эз}}$: $0,13/4\pi - 4,5 \cdot 10^{-3}/4\pi - 7 \cdot 10^{-5}/4\pi$ при изменении l/d цилиндрического стержня: $10 \div 100 \div 1000$. Для многослойной катушки, расположенной на расстоянии x от середины стержня, при длине катушки больше 0,2 длины сердечника M определяется из выражения:

$$M = \frac{\pi d^2 w \mu_{\text{тс}}}{12 \left(2 \frac{D_{\text{ср}}}{d} - 1\right)} \left[1 - 0,255 \left(\frac{l_w^2}{l^2} + 12 \frac{l_x^2}{l^2}\right)\right] \left[4 \left(\frac{D_{\text{ср}}}{d}\right)^2 - 2 \frac{D_{\text{ср}}}{d} + 1\right] [\text{гн} \cdot \text{м}]$$

$$D_{\text{ср}} = \frac{D+d}{2} \text{ - средний диаметр катушки,}$$

D - её наружный диаметр,

d - диаметр сердечника,

l_w - длина катушки,

l - длина сердечника,

l_x - положение катушки относительно средней точки сердечника,

$$\mu_{\text{тс}} = \frac{\mu}{1 + (0,75 \div 0,9) N_{\text{эз}} (\mu/\mu_0 - 1)} \text{ - проницаемость сердечника в}$$

центральном сечении / гн/м /.

Индуктивность многослойной катушки можно найти по формуле:

$$L = \frac{\mu_{\text{тс}} w^2 d^5 K_{xy}}{\mu_0 l_w^2 m^2} \left[1 - 0,255 \left(\frac{l_w^2}{l^2} + 12 \frac{l_x^2}{l^2}\right)\right] \frac{2(0,25 + 0,625 \frac{l_w^2}{l^2})}{\left(2 \frac{D_{\text{ср}}}{d} - 1\right) + \sqrt{2 \frac{D_{\text{ср}}}{d} - 1}} [\text{нГн}]$$

где

m - толщина намотки,

$$x = \frac{l_w}{d}, y = \frac{m}{d}, K_{xy} = \frac{\pi^2 (1+y)^2 x^2 y^2}{x + 1,45y + 0,45 + \frac{2}{3} \frac{1+x/(1+y)}{2+x/(1+y)} \cdot \frac{xy}{1+y}}$$

Ёмкость C_0 для однослойной катушки определяется из эмпирической формулы:

$$C_0 = \frac{\pi D}{8,3 \lg [g/d_m + \sqrt{(g/d_m)^2 + 1}]} [\text{пФ}], \text{ где}$$

g/d_m - отношение шага намотки к диаметру провода,

В выражениях для L и C_0 размеры в см.

Подробный расчёт электрических параметров датчика можно найти в /1/ и /2/. Подобным датчиком с ферритовым концентратором $\mu = 2000$, при параметрах катушки: $w = 10^4$ витков, $D = 15$ мм, $h = 30$ мм, с реостатным усилителем $K=5000$ измерялись поля /3/ в интервале $10^{-4} - 1$ э. Частотные погрешности без коррекции при этом в диапазоне 25 гц - 500 гц не превышали $\pm 2\%$. Достигнутая точность измерения поля $\pm 3\%$. При расчётах датчиков без сердечников /5/ необходимо в приведенных формулах заменить M на магнитный момент катушки:

$$M_0 = \mu_0 w \frac{\pi d^2}{12} \left[4 \left(\frac{D_{\text{ср}}}{d}\right)^2 - 2 \frac{D_{\text{ср}}}{d} + 1\right]$$

$\mu_{\text{тс}}$ на μ_0 , а индуктивность определять по формуле:

$L_0 = w^2 d^5 K_{xy} / l_w^2 m^2$. В остальных расчётах датчиков не отличаются.

В больших полях, порядка 100э и выше, как правило, от ферромагнитных сердечников отказываются. Размеры датчика, его индуктивность и межвитковая ёмкость меньше, это позволяет работать в более широком частотном диапазоне /6,7/. 50 гц - 100кгц /см.таблицу 1/. В этом же диапазоне лежит спектр импульсов большинства измерений ускорительной техники. В обоих случаях применяют интегрирующие цепочки, включенные в цепь датчика. Эквивалентная схема цепи приведена на рис.2 а,б.

В первой схеме включена интегрирующая индуктивность довольно большой величины $\omega_n L \gg R_1 + 2$ и, как правило, намного превосходящая собственную индуктивность $L \gg L_g$.

Выходное напряжение U_2 , в первом приближении,

$$U_2(t) = wS \frac{R_2}{L} H(t) \text{ не зависит от частоты.}$$

Во втором случае, при достаточно большом сопротивлении R_2 : $R_2 + 2 \gg (\omega C)^{-1/2}$ и $R_2 + 2 \gg \omega L$, в первом приближении выходное напряжение также не зависит от частоты:

$$U_2(t) = \frac{wS}{(R+2)C} H(t) \dots \text{ Погрешность интегрирования и в первом случае}$$

$$|\delta_1| = \frac{1}{2} \left[\frac{R_2 + 2}{\omega L} \right]^2 \cdot 100\% \text{ и во втором}$$

$|\delta_2| = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\omega(R_2 + 2)C} \right]^2 \cdot 100\%$ уменьшается с повышением частоты. Указанную частотную погрешность можно частично компенсировать, если в схеме рис.2а включить конденсатор C_k , а в схеме рис.2б цепочку $R_k L_k$.

В работе /6/ экспериментально проверена частотная погрешность, с датчиком, имеющим параметры: $W = 15$ вит, $S = 0,5$ см² (7×7 мм²), $L_g = 2,5$ мкгн, с интегратором первого типа: $L = 0,5$ гн, $R_1 = 15$ ом и второго: $C = 1$ мкф, $R_2 = 30$ ком в диапазоне частот 3000 гц - 100 кгц без коррекции она не превышала 5%.

При диагностике плазмы используют высокочастотные зонды с полосой 1 мгц и выше /8 - 11 /, см.также таблицу 1. Для повышения точности измерений и уменьшения возмущения плазмы в ней стремятся применять датчики минимальных размеров /12/. Катушку обычно экранируют от электростатических наводок /8,10,11/.

Таблица 1

№ лит-ры	Параметры датчика	Погрешность измерения	Диапазон измеряемых полей	Частотный диапазон	Тип интегратора
[3]	$W = 10^4$ вит, $D = 15$ мм, $h = 30$ мм.	$\pm 3\%$	$10^4 \div 10^5$	25 ÷ 500 гц	
[5]	$SW = 10$ м ² , $L = 50$ н, $C = 800$ пф		> 40	40 гц ÷ 10 кгц	
[6]	$W = 15$ вит, $S = 0,5$ см ² (7×7 мм ²), $L = 2,5$ мкгн	5%	0 ÷ 10000э	300 гц ÷ 100 кгц	RC цепочка
[7]	$W = 50$ вит, $6 \times 6 \times 0,5$ мм ³	5%	100э и выше	50 гц ÷ 50 кгц	— " —
[8]	$W = 150$ вит, 2×2 мм ²		~ 2400 э	до 10 мгц	
[9]	$d = 0,15$ мм, $D \sim 2$ мм	15%		от нескольких мгц до 100 мгц	
[10]	$W_1 = 3$ вит, $W_2 = 4$ вит.			50 гц	RC цепочка в цепи м. DC, $R = 100$, $RC = 10^{-3}$
[11]	$W = 3 \div 5$ вит, $D \sim 2$ мм	$\leq 0,1\%$		1 мксек	
[13]	$SW = 5000$ см ² , $L = 12$ мн, $R = 7$ мн, $r = 15$ мн			$\sim 0,5$ мксек	
[17]	$W = 44$ вит, провод $\phi 0,08$ мм, $d = 1$ мм	0,005%	50э ÷ 10 кэ	100 кэ/сек	$K_{инт} = 25000$ с, интегратор в цепи DC.
[18]	$W = 1$ вит, $D = 1 \div 3$ мм, $L \sim 5 \cdot 10^3$ гн	1%	1500э ÷ 12 кэ	50 гц	Отраженный прибор
[19]	Схема с электронным ключом			10 кэ/сек	Усилитель $K = 10^3$, $t_{инт} = \frac{1}{100} \div 2$ сек
[20]					
[21]	Усилитель - интегратор				

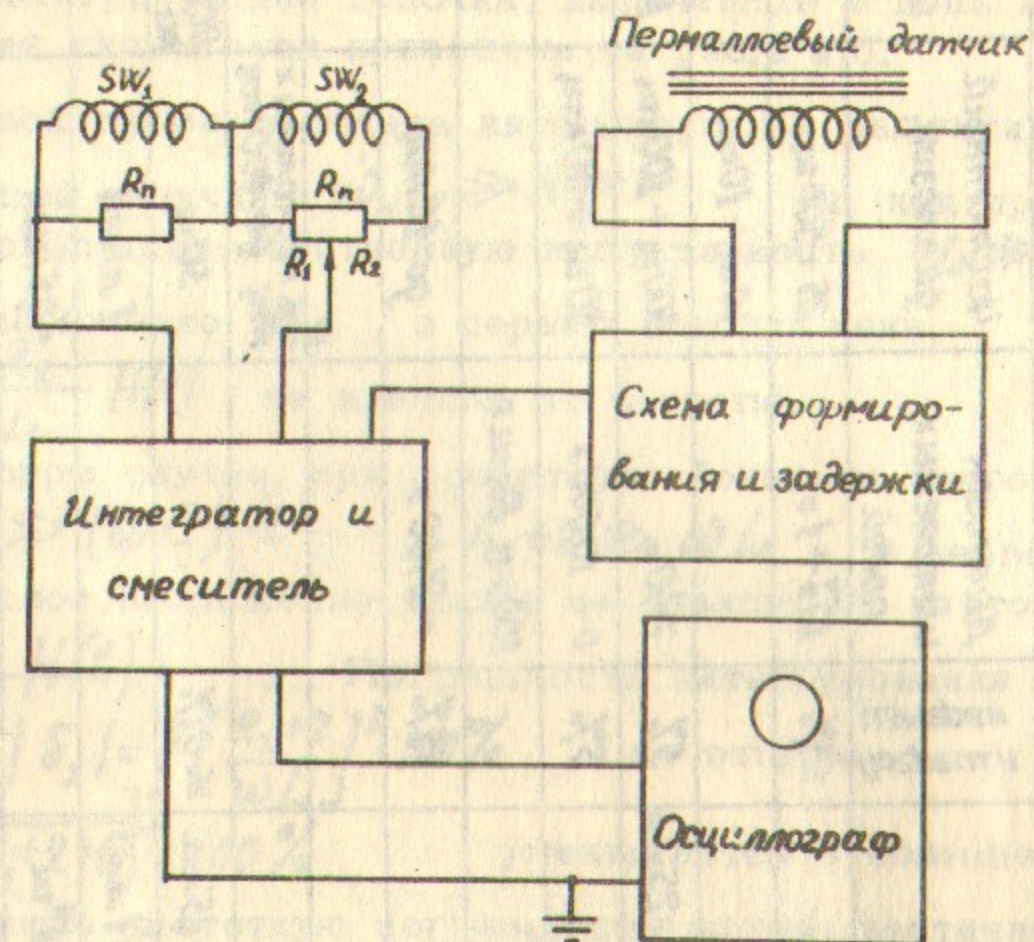


Рис.3

однако, это вносит частотные искажения и там, где возможно, стараются экран не применять. Авторами работы /10/ найдена оригинальная конструкция датчика без экрана, имеющего при большой чувствительности равномерную характеристику от 1 мгц до 50 мгц. Так называемый, двойной зонд состоит из двух катушек $W_1 = 3$ вит, и $W_2 = 4$ вит, расположенных под углом 90° относительно друг друга.

Конструкция и электрические параметры остальных типов датчиков для диагностики плазмы изложены в ряде работ /8,9,17, 18/. Погрешность измерения индукционным датчиком на высоких частотах 5% и выше. Расчёт таких датчиков не отличается от приведенного выше для звуковых и ультразвуковых частот.

При относительных измерениях магнитного поля, в частности в ускорительной технике, пользуются дифференциальным методом /13,19/. На рис.3 приведена блок-схема таких измерений. Одна из катушек SW_0 помещается в опорную точку, относительно которой ведут измерения. Вторая катушка перемещается в поле. Катушки включены вторично и изменением отношения R_1/R_2 добиваются нулевого сигнала в заданный момент, который фиксируется на осциллографе с помощью меток нулевого поля и момента измерения. Метки получают с помощью пермалловых датчиков и схемы задержки. Разностный сигнал затем интегрируется и подаётся на осциллограф. Такой метод измерения позволяет на порядок уменьшить погрешность. Так в работе /13/ при измерении на частоте 50 гц удалось снизить погрешность измерений до 0,1%. В подобных случаях, как правило, применяют катушки, измеряющие магнитное поле в точке. Длина такой цилиндрической многослойной катушки определяется по формуле:

$$l_{\text{длинны}} = \sqrt{\frac{9}{20} \frac{R^5 - r^5}{R^3 - r^3}}$$
 и однослойной катушки, $R=2=r$: $l_0 = R_0 \sqrt{3}$. При однородном поле вдоль плоской прямоугольной катушки её высота h должна быть

равной: $h = \sqrt{2(a^2 + b^2)}$, где a и b - полуширина внутреннего и наружного слоя соответственно. Подробный расчёт таких катушек дан в /14/ и /15/.

При измерении импульсных полей, кроме параметров, указанных ранее, важно учесть переходные процессы, влияющие на точность воспроизведения формы импульса. Большие паразитные шум-

тирующие ёмкости, в том числе и межвитковая ёмкость самого датчика, приводят к большому времени, а также колебательному характеру установления выходного напряжения, в особенности при малых фронтах нарастания. Эквивалентную схему входной цепи без интегратора можно представить, как показано на рис.1.

Работа схемы описывается дифференциальным уравнением вида:

$$\frac{\bar{u}}{\bar{e}} = K_0 \frac{1}{p^2 + 2\omega_1 \lambda p + \omega_1^2}$$

, где

p - оператор,

$$K_0 = \frac{R}{R+2} \quad \text{- коэффициент деления на постоянном токе,}$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{K_0 LC}} \quad \text{- собственная частота схемы,}$$

$$\lambda = \frac{1}{2} \sqrt{K_0 \frac{2C+L/R}{LC}} \quad \text{- коэффициент демпфирования.}$$

Для малых времен аperiodического переходного процесса необходим критический режим работы: $\lambda = 0,707$. При достаточно малом сопротивлении потерь датчика $2 \ll R$ и $2 \ll \sqrt{L/C}$ сопротивление его нагрузки R найдется из формулы:

$$R = \omega_1 L / \sqrt{2} \quad \text{. Время установления при } \lambda = 0,707 \text{ определяется частотой собственных колебаний и с погрешностью } \sim 5\% \text{ равна } \tau_a = \pi / \omega_1 \text{ . Иногда выбор частоты определяется полосой пропускания усилительного устройства, тогда берут } \omega_1 < 3\omega_{cp}$$

где ω_{cp} - граничная частота усилителя. В частности, при импульсном разряде в плазме, на датчике наводится эдс:

$$e(t) = I(t) \frac{d}{dt} (e^{-\lambda t} \cdot \sin \omega_1 t)$$

, где

$I(t)$ - единичная функция.

Когда ω_1 больше частоты разряда β , возникают собственные колебания с частотой $\omega_c = \omega_1 / \sqrt{2}$. Например, при $\omega_1 / \beta = 2$ $u(t)$ воспроизводит $e(t)$ с точностью 5% только с момента $t = 2\pi / 4\beta$, а при $\omega_1 / \beta = 3 - 5$ собственные частоты затухают только через $\Delta t \sim 1,5 / \omega_1$.

В последнем случае Δt не зависит от λ и β . Чтобы исключить влияние переходного процесса, необходимо время нарастания собственных частот делать в 5 - 10 раз меньше фронта нарастания $e(t)$. Экспериментально найдено, что достаточно сделать $\tau_e \sim 8 / \omega_1$ 116/.

При колебательном режиме установления входной цепи его время определяется равенством: $\tau = 0,75\pi \left(\frac{1}{RC} + \frac{1}{L} \right)$.

Ёмкость катушки уменьшают секционированием или другими специальными мерами. Это особенно важно при дифференциальных измерениях в импульсном поле, где необходимо существенно увеличивать точность. В этом отношении выигрыш даёт метод трех катушек 119/. Методика измерения аналогична, описанной ранее, с двумя катушками. Только последовательно с SW_0 (рис.3) включена дополнительная компенсационная катушка SW_0' , которая крепится рядом, и её ось перпендикулярна силовой линии. Поворотом катушки SW_0' добиваются нуля выходного сигнала. Отпадает необходимость в потенциометре и, следовательно, в дополнительных подводящих проводах. Величина поля в точке размещения третьей катушки определяется выражением:

$$H_1 = \frac{H_0 SW_0 (1 + \lambda \cos d)}{SW_1}$$

, где

$$K = \frac{R_2''}{R_2' + R_2''}, \quad \lambda = \frac{SW_0'}{SW_0}$$

H_0 - напряжённость поля в центре катушек SW_0 и SW_0'

d - угол между направлением силовой линии и осью катушки SW_0' .

Этот метод позволил снизить погрешность измерения полей 50э - 10кэ, при скорости нарастания их 100 кэ/сек, до 0,005% /19/. Оригинальный метод измерения мгновенного значения периодических импульсных полей предложен в работе /20/. Из импульса напряжения, полученного с индукционного датчика, вырезается с помощью электронного ключа его часть в интервале $t_1 \div t_2$, которая после усиления интегрируется. Среднее значение напряжения:

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} e(t) dt = \frac{SW}{T} [H(t_2) - H(t_1)]$$

где T - период повторения измеряемого магнитного поля. Если выбрать $H(t_1) = 0$, то $U_{\text{ср}} = \frac{SW}{T} H(t_2)$, т.е. выходное напряжение пропорционально мгновенному значению поля. Индикация нуля поля осуществляется пермалловым датчиком. Авторами /20/ получена точность 1% при измерении полей 1,5 - 12 кэ и частоте повторения поля 50 гц.

Интегрирующие усилители позволяют существенно улучшить точность и расширить частотный диапазон интегрирования в сторону низких частот. Их применяют для измерения сравнительно медленных процессов ≤ 50 мксек. Расчёт параметров интегрирующих усилителей, их схемы, приведены в ряде работ /13,19,21/, а также даются в таблице 1.

Изготовленные датчики, как правило, калибруются в переменном эталонном магнитном поле или импульсном, в зависимости от назначения датчика. Заслуживают особого внимания две методики калибровки: в переменном поле колец Гельмгольца /10/ и в импульсном поле витка /8/. В первом случае для калибровки зонда в диапазоне 1 - 50 мгц применялись сменные кольца Гельмгольца с количеством витков $W = 10; 4; 2; 1$, собственные частоты которых были соответственно: 13; 29,5; 50,5 и 105 мгц. Каждый образец использовался на частоте значительно ниже его собственной частоты, а именно: первый в диапазоне 1 - 2 мгц, второй 2 - 6 мгц, третий 6 - 15 мгц, четвертый 15 - 50 мгц. Поле колец определялось расчётным путем, по формуле:

$$B_2 = \frac{\mu_0 W Y}{a} \left(\frac{8}{5}\right)^{\frac{3}{2}} [eS]$$

a - радиус катушек и расстояние между ними / м /,

Y - ток катушек / а /.

Ток питания стабилизировался. Погрешность такого метода калибровки $\sim 5\%$ при погрешности измерительных приборов $\sim 3\%$.

Во втором случае поле создавалось витком. Ток шины измерялся поясом Роговского и с учётом периода и затухания, которые определяли скин-эффект, рассчитывалась величина магнитного поля.

К достоинствам индукционного метода измерений следует отнести малую зависимость показаний от окружающих условий, простота конструкции, малый уровень шумов.

Однако, размеры датчиков сравнительно велики, а диапазон рабочих частот для каждого датчика мал.

Динамический диапазон измеряемых полей индукционным методом довольно широк: $\sim 10^{-4}$ э - 10^6 э.

2. Метод феррозонда

Методика измерения мгновенных значений переменного и импульсного магнитных полей с помощью пермалловых ленточных и проволочных или тороидальных ферритовых сердечников не отличается существенно от измерений постоянного магнитного поля. Подробную методику измерения постоянного поля можно найти в /4/. Максимальная величина магнитного поля, измеряемого этим методом, как правило, не превышает 100 э, при скорости изменения магнитного поля dH/dt ; ~ 20 кэ/сек - 100 кэ/сек. Метод нашел применение, в основном, в ускорительной технике для измерения магнитного поля в момент инжекции и топографии поля. Феррозонд представляет собой термически обработанную пермалловую ленту или проволочку, помещенную в кварцевую трубку, на которую наматывается две обмотки: сигнальная и компенсационная. Зонд располагается вдоль силовых линий поля. С помощью компенсационной обмотки устанавливается необходимая величина поля в зонде H_k . Измеряемое поле H_u направлено встречно, при равенстве полей $H_k \approx H_u$ происходит перемагничивание пермаллового сердечника. В сигнальной обмотке появляется короткий импульс эдс $e = -SW \mu_{\text{дс}} dH/dt [B]$, где S - площадь поперечного сечения пермаллоя /м²/, $\mu_{\text{дс}}$ - динамическая проницаемость сердечника / гн/м /, W - количество витков сигнальной обмотки.

Напряжение сигнала через дифференцирующую цепочку подается на Y -вход осциллографа. Одновременно, на X -пластины подается напряжение, пропорциональное напряженности поля. Совмещая начало развертки с моментом появления магнитного поля, по экрану осциллографа определяют время нарастания поля, а по току в компенсационной обмотке его величину. Наибольшее распространение получил метод феррозонда в относительных измерениях магнитного поля, когда применяют два датчика: один из них остается неподвижным и в нём устанавливается заданное компенсационное поле, а другой перемещается в поле. Изменяя ток подмагничивания последнего, добиваются совмещения импульсов обоих датчиков. По величине тока второго датчика вычисляют искомое значение поля. Несколько видоизмененная методика предлагается, например, в /22/. Чувствительность схем с феррозондом достигает $2-3 \cdot 10^{-3}$ э /23,24/ и растёт с увеличением эквивалентной проницаемости сердечника

$$\mu_{\text{э}} = \frac{\mu}{1 + N(\mu/\mu_0 - 1)} \quad [\text{гн/м}], \text{ где}$$

μ - проницаемость материала сердечника / гн/м /,
 N - коэффициент размагничивания.

Проницаемость материала существенно зависит от обработки пермаллоя. Вопросы технологии подробно изложены в работах /25, 26/. Для уменьшения коэффициента размагничивания необходимо увеличивать отношение l/d датчика. Обычно удаётся получить $(l/d) \sim 500$, т.к. длина сердечника обычно ~ 10 мм, а его диаметр десятки микрон /26 - 28/. На точность метода существенно влияет ширина импульса сигнала, которая в свою очередь зависит от величины коэрцитивной силы и скорости перемагничивания. Коэрцитивная сила сердечника увеличивается с уменьшением толщины /14,28/ и последнюю выбирают из компромиссных соображений оптимальной чувствительности и точности. Погрешность относительных измерений $\sim 0,1\%$. Специальная методика /23/ позволяет снизить её до $0,001\%$. Вопросы влияния скорости перемагничивания и неоднородности магнитного поля подробно исследованы в работах /23,24,28/.

Достоинство метода заключается в простоте работы с датчиком, его большая чувствительность и точность относительных измерений.

Малый динамический диапазон измерений 10^{-3} э - 10^2 э, малая точность при абсолютных измерениях, дискретность последних, ограничение по скорости изменения поля не позволили этому методу найти широкое распространение в измерениях переменных полей.

3. Эффект Холла

Широкое распространение в настоящее время получил метод с использованием датчика Холла, представляющего собой пластинку или плёнку полупроводникового материала Ge , $InAs$ или $InSb$ с ярко выраженным эффектом. Если вдоль прямоугольной такой пластинки пропустить ток, то в магнитном поле, в перпендикулярном току и полю направлении, появится эдс Холла, рис.4:

$$U_x [B] = \frac{10^{-8}}{d [c.m]} R [cm^3/kup] \cdot I [a] \cdot H [э] \cdot \sin \alpha$$

где

R - постоянная Холла используемого материала, обычно

$$R = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{1}{n \cdot e \cdot c}$$

d - толщина датчика,

n - концентрация носителей заряда в единице объёма материала,

e - заряд электрона, c - скорость света,

α - угол между направлением поля и тока (в дальнейшем будем считать $\alpha = \frac{\pi}{2}$).

Постоянная Холла образца зависит от отношения l/a , т.е.

$$R_0 = R \cdot \psi(l/a)$$

. Обычно, для каждого датчика она находится экспериментально, поэтому $\psi(l/a)$ автоматически учитывается. В настоящее время разработан ряд приборов для измерения гармонических и периодических импульсных магнитных полей с питанием датчика стабилизированным постоянным /29 - 31/ и переменным /32,33/ током. Из приведенной выше формулы очевидно, что при постоянном токе I_0 поведение эдс Холла во времени будет таким же, как и $H(t)$. Во втором случае происходит амплитудная модуляция тока полем более низкой частоты:

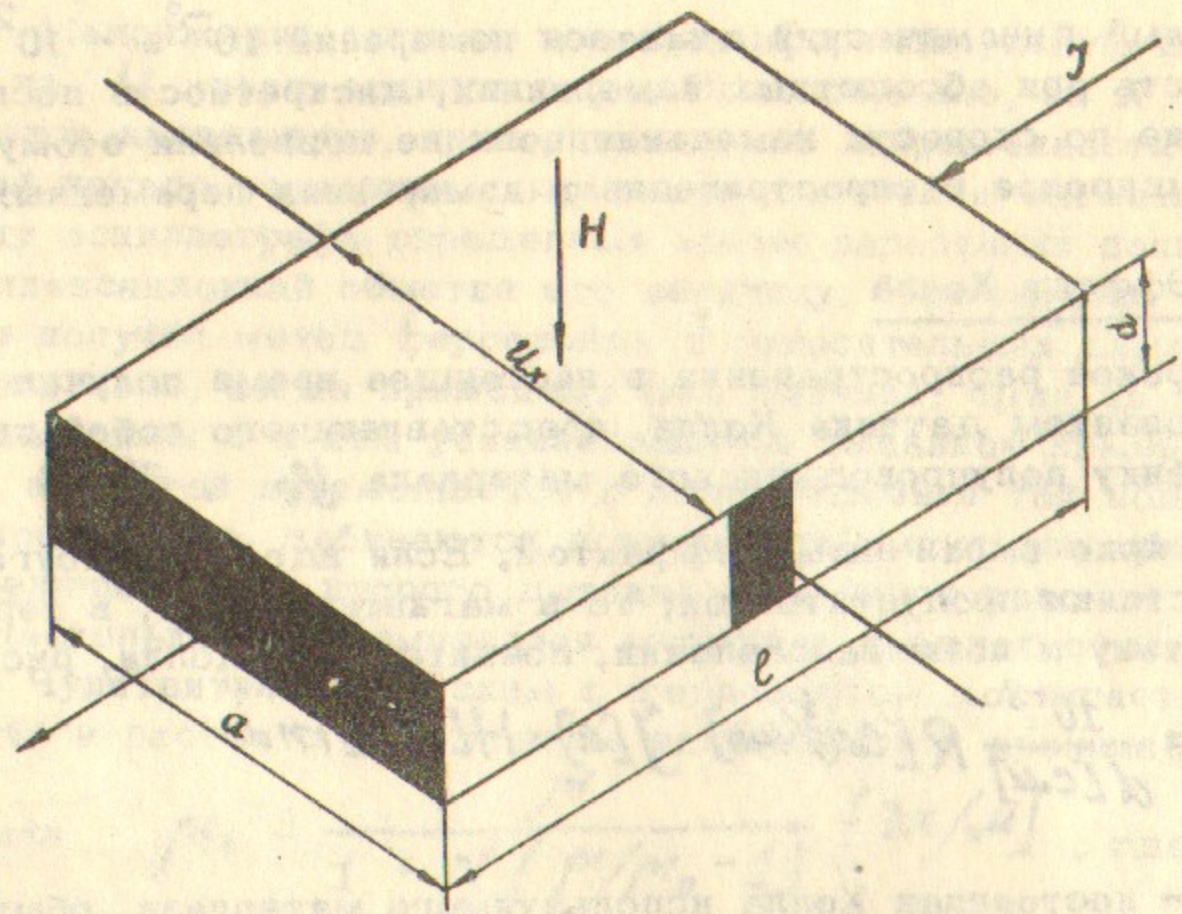


Рис.4

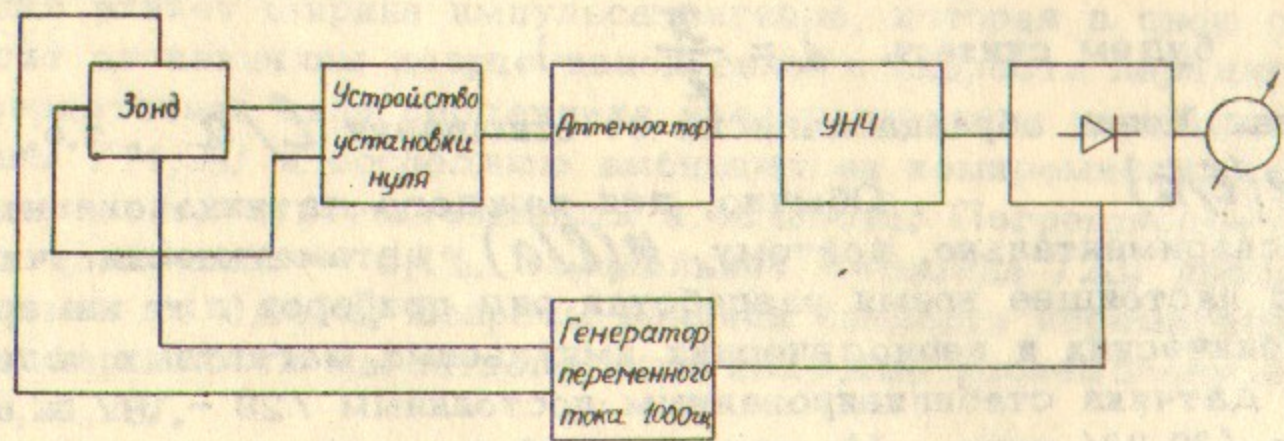


Рис.5

$$U_x = \frac{R_d}{d} I_m H_m \sin \omega_d t \cdot \sin \omega_H t$$

Сигнал после усиления, синхронного детектирования подаётся на индикатор переменного тока. Блок-схема такого прибора приведена на рис.5 /33/. При измерении импульсных полей датчик обычно питается постоянным током.

Динамический диапазон измерения датчиком Холла 1э - 20кэ. В некоторых случаях удаётся расширить диапазон в сторону малых полей до 0,02 - 0,03 э /34,35/ и больших до 50 кэ /34/, а в комплексе с висмутовой спиралью от 0,001э до 100 кэ /36/. Частотный диапазон приборов при питании переменным током обычно не превышает 500 гц. Приборы с питанием постоянным током могут работать в синусоидальных полях до 200 кгц и импульсных ~ 20 мксек - 20 мсек.

Основная погрешность таких приборов колеблется в пределах 1% - 5%. Дополнительная частотная погрешность 2 - 3% и температурная, без термостатирования, 1% - 3% на 10°С.

Для измерения слабых полей применяют ферромагнитные концентраторы. При этом удаётся увеличить чувствительность в 100 - 1000 раз и довести её до нескольких вольт на эрстед /37/. Одновременно возрастает частотная погрешность датчика до ~ 5% в частотном диапазоне 0 - 10 кгц.

Заслуживает внимания стробоскопический магнитометр /38/ для измерения периодически меняющегося поля любой формы с частотным спектром до нескольких мгц. Датчиком служит полупроводниковая плёнка с концентратором. Блок-схема приборов приведена на рис.6.

Напряжение, синхронное с магнитным полем, запускает генератор калиброванной пилы, выходной сигнал которого сравнивается с медленноменяющимся напряжением. Положение луча по оси X осциллографа также определяется этим напряжением. Импульсы сравнения после триггера подаются на импульсный генератор, который вырабатывает строб-импульсы тока постоянной амплитуды для питания датчика. Эдс Холла после усиления подаётся на вертикально - отклоняющие пластины осциллографа. Предельная чувствительность такого магнитометра 10^{-3} э на частоте 1 кгц. Отклонение от линейности не более 2%. Частотный диапазон измерений 100гц - 5 мгц. Конструктивные данные и электрические параметры некоторых приборов и датчиков Холла приведены в таблице 2.

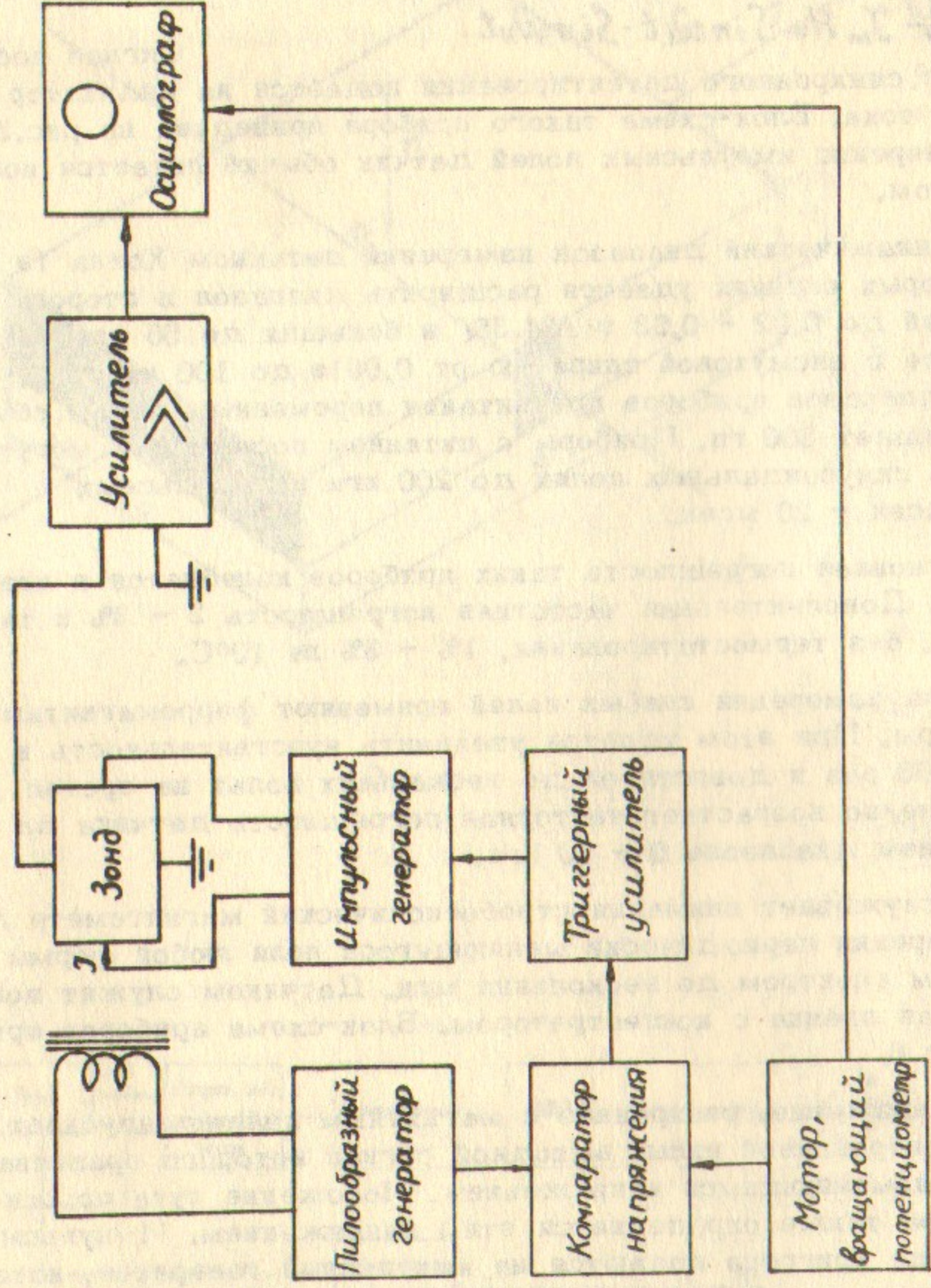


Рис. 6

Таблица 2

№ литеры	Параметры и питание датчика	Диапазон полей	Частотный диапазон и частотная погрешность	Основная погрешность и температурная
[29]	$V_c: 1,2 \times 1,5 \times 0,02 \text{ см}^3$, в электростатическом экране, термостабилизирован. Питание постоянным током	$1 \div 1000 \text{ э}$	$20 \text{ мксек} \div 20 \text{ мксек}$	$\pm (2 \div 3) \%$
[30]	$V_c: 1,5 \times 2 \times 0,3 \text{ мм}^3$, ф-зонда $0,8 \text{ мм}$ Питание постоянным током	$500 \div 2500 \text{ э}$	$40 \text{ Гц} \div 10 \text{ кГц}$	$\pm 2,5\% \text{ и}$ $\pm 2,5\% \text{ на } 10^\circ\text{C}$
[31]	$V_c: 2 \times 1,0 \times 0,3 \text{ мм}^3$ Питание постоянным током	$200 \text{ э} \div 2 \text{ кэ}$	$20 \text{ Гц} \div 200 \text{ кГц}$	$\pm 2,5\% \text{ и}$ $\pm 1,5\% \text{ на } 10^\circ\text{C}$
[32]	Питание стабилизированным током 1000 Гц	$0 \div 20 \text{ кэ}$	$40 \div 500 \text{ Гц}$ $\pm 3\%$	$\pm 2,5\% (50 \text{ Гц})$
[33]	— " —	$300 \text{ э} \div 30 \text{ кэ}$		$\pm (1 \div 2) \%$
[34]		$0,02 \div 50 \text{ кэ}$	$0 \div 400 \text{ Гц}$	—
[35]	$V_c A_s$ - пленка	$0,03 \div 20 \text{ кэ}$	$20 \text{ Гц} \div 400 \text{ Гц}$	$1\% \text{ и}$ $1\% \text{ на } 10^\circ\text{C}$
[36]	$V_c A_s$ - пленка	$0,001 \text{ э} \div 100 \text{ кэ}$	Пост. и перем. магнитное поле до 400 Гц	2%
[37]	Датчик Холла V_c $5 \times 2,5 \times 0,1$ с концентратором из му-металла	Чувствительность 1 В/э	$0 \div 10 \text{ кГц}$ $5\% \text{ на } 10 \text{ кГц}$	
[38]	Датчик Холла с концентратором	Чувствительность 10^{-3} э	$100 \text{ Гц} \div 5 \text{ мГц}$	Линейность 2%

Основным достоинством датчика Холла являются его малые размеры. Толщина плёночных датчиков с оксидной подложкой может достигать сотых долей мм, что важно при измерении плоских полей в узких зазорах. Динамический диапазон измеряемых полей этого метода от 10^{-3} э до 50 кэ.

Однако, датчик требует к себе специального питания, он довольно малой чувствительности и наводки на провода часто превышают сигнал. Его показания зависят от температуры и существует трудно устранимый паразитный сигнал неэквивалентности.

4. Эффект Фарадея

В ряде работ при измерении импульсного магнитного поля используется эффект Фарадея. В качестве датчика применяют небольших размеров светопровод с большой постоянной Верде V .

Например, автор работы /40/ использовал бензол $V=0,0588$ / мин/э.см /, в /41/ использовалось специальное стекло $V=0,1$ / мин/э.см /. Такой датчик при прохождении через него плоскополяризованного света в магнитном поле, направленном вдоль световода пучка, поворачивает плоскость поляризации на угол $\alpha = VNH$, где

l - длина светового пути в датчике / см /,

H - измеряемое магнитное поле / э /.

После датчика ставится анализатор, который в исходном положении пропускает минимум света I_0 . При наличии магнитного поля выходной световой поток анализатора меняется по закону:

$$I_{\text{вых}} = I_0 + I_1 \sin^2 \alpha, \text{ где}$$

I_1 - амплитуда переменной составляющей интенсивности света. Таким образом, электрический сигнал фотоприёмника, пропорциональный световому потоку, жестко связан с величиной магнитного поля $I_{\text{вых}} = I_0 + I_1 \sin^2 KH$, где $K = VV$.

Очевидно, что зависимость между электрическим сигналом и полем нелинейна, и результаты требуют дополнительных математических обработок. Однако, эффект Фарадея практически безинерционен и характеризуется временами $\sim 10^{-10}$ сек. Датчик может быть выполнен очень тонким $d \sim 1$ мм, что особенно важно при плазменной диагностике /41/. Благодаря этим достоинствам, метод при-

влекает внимание экспериментаторов. Оптическая схема измерений приведена на рис.7.

Световой луч от источника И проходит через теплоизолирующую кюветку К, интерференционный фильтр Ф, поляризатор П и фокусируется линзой Л на переднюю торцевую поверхность датчика Д. После ячейки Фарадея и анализатора А свет фокусируется на катоде фотоумножителя ФП. На пути светового потока ставится ряд диафрагм $D_1 - D_4$, предохраняющих от попадания постороннего света и формирующих пучок.

Применение в качестве источника лазера упрощает схему: отпадает необходимость в левой половине схемы и световой пучок сразу направляется на торец датчика.

Измерения в плазме /41/ усложнены тем, что она является источником света, поэтому перед фотоумножителем ставят спектрограф или интерференционные фильтры с Фабри-Перо.

Для повышения чувствительности регистрирующей аппаратуры применяют датчики с многократным отражением, увеличивающие световой путь при той же длине датчика, как показано на рис.8 а. Однако, такие датчики имеют малую разрешающую способность в поперечном направлении. В работе /41/ предлагается использовать конфокальную систему с полупрозрачными зеркальными торцами, рис.8б. Такая система не имеет упомянутого недостатка и даёт многократное отражение, но в ней происходит ослабление света ~ 10 , и на выходе существуют световые лучи с разными углами поворота плоскости поляризации.

При заданных размерах и конструкции датчика чувствительность и точность аппаратуры ограничена шумами фотоумножителя. Как известно, отношение сигнал-шум в фотоумножителе определяется выражением: $S/N = \left(\frac{qY}{2h\nu\phi} \right)^{1/2}$, где

q - эффективность катода,

Y - суммарный световой поток, падающий на фотоумножитель,

h - постоянная Планка,

ν - частота световой волны,

ϕ - полоса рабочих частот системы регистрации.

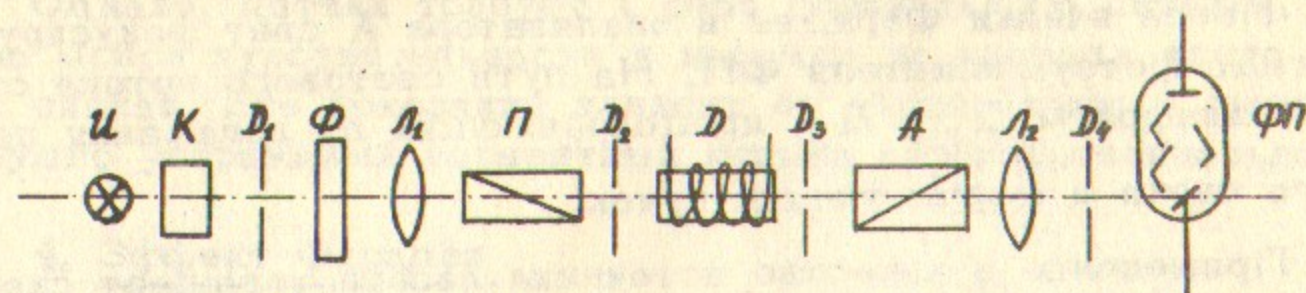


Рис.7

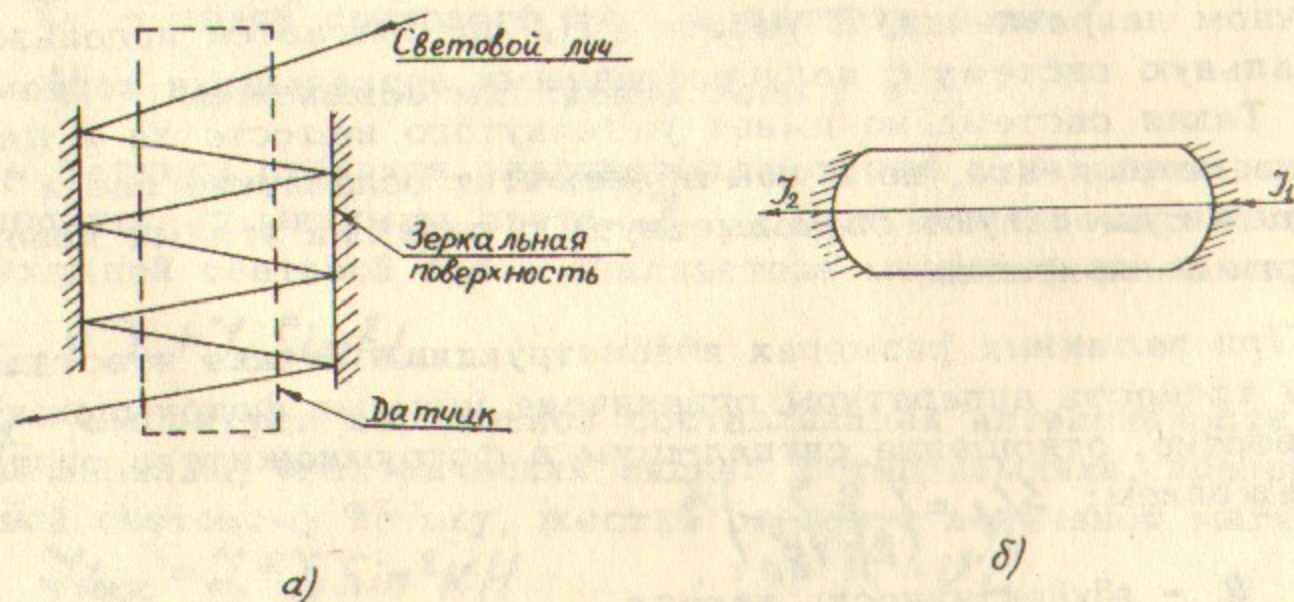


Рис.8

Калибровку аппаратуры производят в отсутствии магнитного поля: поворотом анализатора на заданный угол α' , измеряют полученный световой поток $y' = I_0 \sin^2 \alpha'$ и сравнивают затем его с искомым $y = I_0 \sin^2 \alpha$ в магнитном поле, в этом случае:

$$\sin \alpha = \sin \alpha' \sqrt{y/y'}$$

Используя описанный метод и схему по рис.7, Ветцелю /40/ удалось получить совпадение экспериментальных данных с расчётами с точностью 5% в диапазоне 10 - 30 кэ. Авторы другой работы для измерения в плазме /41/ применяли гелий-неоновый лазер: $P = 0,2$ мвт, $\lambda = 0,6328 \mu\text{м}$ с диаметром луча 2 мм, в качестве оптического элемента служило стекло $V = 0,1$ / мин/э.см / ($l = 4$ мм, $d = 3$ мм). Полученные результаты измерения импульсного магнитного поля ~ 12 кэ со спектром в частотном диапазоне 0 - 30 мгц отличались от контрольных не более чем на 7%.

Метод применяется для измерения полей от 1 кэ до 5 мгэ.

К достоинствам метода, кроме малых размеров датчика, следует отнести отсутствие подводных проводов.

Основными недостатками являются сложность аппаратуры и необходимость ввода в измеряемый объём светового луча. Кроме того, результаты измерений требуют дальнейшей математической обработки.

5. Магниторезистивный эффект

Привлекает к себе, с точки зрения измерения высокочастотных и быстро меняющихся импульсных магнитных полей, метод с применением магниторезистивного эффекта, практически реализованный до частот порядка 65 мгц авторами работы /42/. Датчиком в этом методе служит ферромагнитная плёнка толщиной 1 - 2 $\mu\text{м}$ (состав компонент для максимального эффекта $\text{Ni} - 73\%$, $\text{Fe} - 16\%$, $\text{Co} - 11\%$), которая наносится на стеклянную подложку, разогретую до температуры 420°C. Плёнка затем протравливается таким образом, что получается элемент, сходный с мостом. На рис.9а показано конструктивное исполнение датчика, темные линии соответствуют протравленным местам, а на рис.9б приведена его эквивалентная электрическая схема. Плёнку можно изготовить как изо-

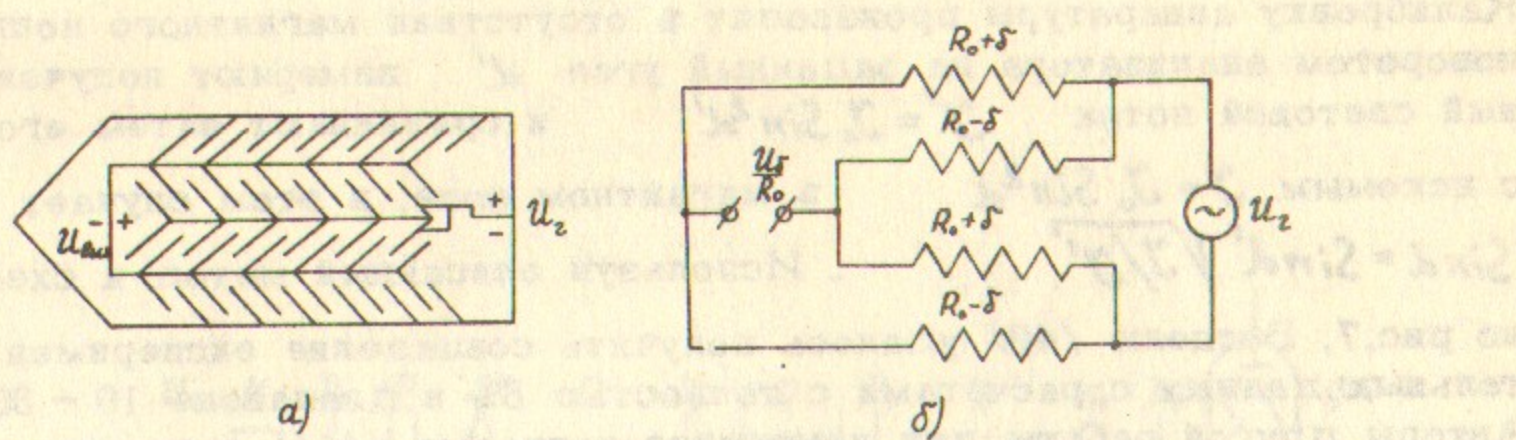


Рис. 9а. U_2 - напряжение источника питания, $U_{\text{вых}}$ - напряжение разбаланса моста; б. U_2 - напряжение источника питания, U_2/R_0 - максимально возможный ток разбаланса.

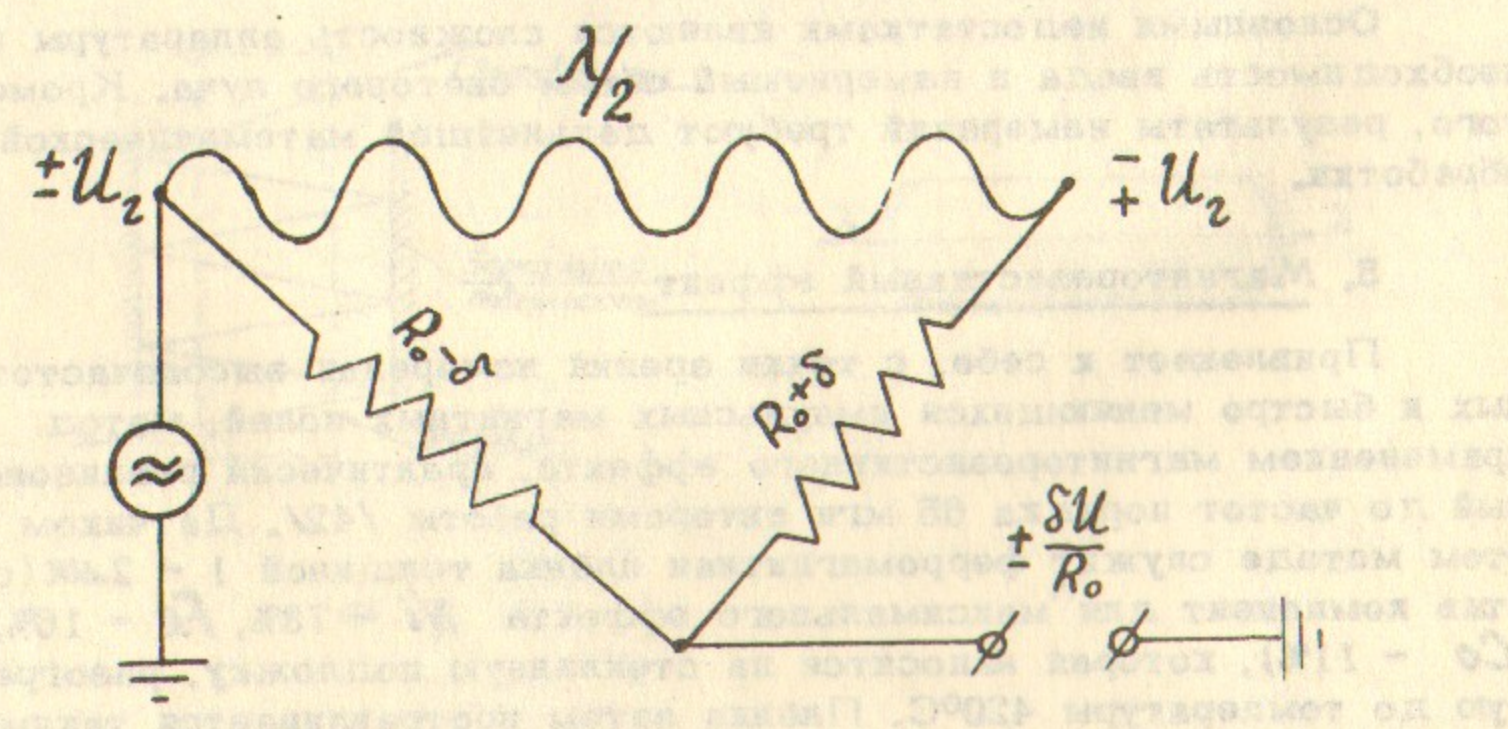


Рис. 10. U_2 - напряжение источника питания, $\frac{\delta U}{R_0}$ - напряжение разбаланса моста, $\lambda/2$ - полуволновая линия.

тропной, так и с ориентацией в определенном направлении. Электрическое сопротивление плёнки в направлении намагниченности на 3-4% больше, чем в перпендикулярном направлении и выражается формулой: $R = R_0 + \frac{1}{2} \Delta R \cos 2\varphi$, где φ - угол между анизотропной намагниченностью H_a и током. Максимальная чувствительность датчика будет при $\varphi = 45^\circ$. Во внешнем магнитном поле смещения H_c , направленном вдоль оси легкого намагничивания x , и измеряемом поле H_u , направленном вдоль оси y , при $H_c \gg H_a$, в первом приближении:

$$R = R_0 + \Delta R \cdot \frac{H_u}{H_c} \left[1 - \left(\frac{H_u}{H_c} \right)^2 + \dots \right]$$

Если $H_u < 0,1 H_c$, то отклонение от линейности функции $R(H_a)$ не более 1%. Если H_c направить вдоль оси трудного намагничивания y , а H_u вдоль оси x , то при $|H_a| < |H_c|$ и $|H_u| \ll |H_c - H_a|$ в первом приближении

$R \approx R_0 + \Delta R \frac{H_u}{H_c - H_u}$. Очевидно, что во втором случае чувствительность будет больше. Таким образом, меняя ориентацию H_c и его величину, можно изменять пределы измерения H_u от 1э до нескольких кэ. Мостовая схема позволяет измерять 2 - 4% отклонения сопротивлений с хорошей точностью, т.к. она реагирует только на изменение сопротивлений: $\delta = \frac{1}{2} \Delta R \cos 2\varphi'$, где φ' - угол между эквивалентной намагниченностью и направлением тока.

Питание моста может осуществляться как на постоянном, так и на переменном токе. Во втором случае на выходе появляется амплитудно-модулированный сигнал с глубиной модуляции 60 - 100%.

Авторами [42] разработана оригинальная конструкция мостового датчика для работы на несущей частоте 300 мГц. Плёнка протравлена с учётом минимального влияния ёмкости ввода. Затем напылена медная полуволновая линия, омическое сопротивление которой меньше 0,5 ома. Сопротивление каждой половины плёнки 100 ом. Такая конструкция позволяет решить вопрос заземлений. Эквивалентная схема датчика приведена на рис.10. Генератор соединялся 50-омным кабелем с датчиком. Выходной сигнал через режекторный и низкочастотный фильтры подавался на усилитель с полосой пропускания 20 гц - 400 мГц. После усиления и детектирования сигнал измерялся индикатором. Такое устройство позволило авторам вести измерения в полосе до 65 мГц с точностью 5% во всем час -

тотном диапазоне. Воспроизводимость показаний прибора не хуже 2%. К колебаниям температуры датчик не чувствителен. Измерение полей ниже 1э ограничено шумами резисторов.

Основным достоинством описанного метода является сравнительная простота измерительной аппаратуры, безинерционность датчика и хорошая точность измерений.

Необходимость дополнительного поля смещения и малый динамический диапазон затрудняет его применение во многих практических задачах.

6. Эффект Зеемана

Для измерения больших импульсных полей до 10 мгэ в некоторых работах использован продольный нормальный эффект Зеемана [43, 44]. Эффект заключается в том, что свет поляризуется в магнитном поле и при продольном эффекте вместо неполяризованного светового луча с длиной волны λ появляются две компоненты $\lambda + \Delta\lambda$ и $\lambda - \Delta\lambda$ поляризованные по кругу. Величина смещения длины волны определяется по формуле: $\Delta\lambda = \pm \frac{eH}{4\pi mc}$. Пропорциональность между $\Delta\lambda$ и H соблюдается с точностью $\sim 10^{-5}$. Методика измерения состоит в измерении двойного изменения длины волны поляризованного света с помощью спектрографа. Автору работы [43] удалось, используя в диапазоне до $5,1\text{ мггс}$ линию Na_D (5893 \AA) и линию Zn^+ (4102 \AA), получить максимальный разрыв между симметричными линиями ($2\Delta\lambda$) $30\text{ \AA}/1\text{ мгэ}$ для линии Na и $20\text{ \AA}/1\text{ мггс}$ для Zn . Погрешность измерения составляла 5%.

Л и т е р а т у р а

- / 1 / Мизюк Л.Я., Ничога В.А. Электрические параметры индукционных низкочастотных магнитоприёмников с ферромагнитными сердечниками. Сб. Геофизическое приборостроение, вып.20, Л., "Недра", 1964.
- / 2 / Левченко Д.Г., Котюк А.Ф. Индукционные датчики заданных размеров для измерения слабых магнитных полей звуковой частоты. Известия АН. Серия геофизическая, № 2, 1964, с.247.
- / 3 / Минкин М.Б., Цырульников Б.Н. Индукционный измеритель слабых переменных магнитных полей. Измерительная техника, № 5, 1966, 90.
- / 4 / Розенблат М.А. Коэффициенты размагничивания стержней высокой проницаемости, ЖТФ, т.14, вып.4, 1954.
- / 5 / Корневский Л.Н. К расчёту индуктивных преобразователей переменного электромагнитного поля. Измерительная техника, 1966, № 5.
- / 6 / Мазуров М.Е. Индукционный метод измерения переменных магнитных полей. Измерительная техника, № 3, 1962.
- / 7 / Мазуров М.Е. Прибор для измерения переменных магнитных полей. ПТЭ, № 4, 1963, 146.
- / 8 / Макаров Ю.В. и Нартов С.В. Некоторые результаты исследования магнитного поля в гидромагнитной ударной трубе. ЖТФ, 1963, 33, № 6, 724.
- / 9 / Малкин О.А., Рейс И.А., Степанов А.М. Малогабаритный зонд для измерения переменных магнитных полей. ПТЭ, №2, 1966, 151.
- / 10 / Phillips R.C., Turner E.B. Construction calibration techniques of high frequency magnetic probes. Rev. Scient. Instrum., 1965, 36, N12.
- / 11 / Русанов В.Д. Современные методы исследования плазмы. Госатомиздат, М., 1962, 105.

/ 12 / *U. Ecker, W. Kröll, O. Löllner. Ann. Phys., 1962, 7, 10, 220.*

/ 13 / Алексеев А.Г., Мозин И.В., Смирнов В.П. Метод и аппаратура для магнитных измерений в электронном синхротроне с жесткой фокусировкой в диапазоне полей 500 - 10000э. Сб. Электрофизическая аппаратура, вып.2, М., 1964, Атомиздат.

/ 14 / Гольдин Л.Л., Скачков С.В., Шорин С.В. Магнитные измерения в ускорителях заряженных частиц. Госатомиздат, М., 1962.

/ 15 / *Herzog R.F.K., Tischler O., Rev. Scient. Instrum., 24, 1000 (1953).*

/ 16 / *Malesani U. Sul comportamento di alcuni dispositivi per la misura di grandezze coordinate magnetiche transitorie, Elettronica, N1, 53, 1966.*

/ 17 / Бурхардт Л.С., Ловберг Р.Х., Дж.А.Филлипс. Магнитные измерения в импульсном разряде, частично стабилизированном продольным магнитным полем. УФН, 1958, 65, 2, 188.

/ 18 / Куртмуллаев Р.Х., Пильский В.И. Применение методов зондовой и микроволновой диагностики для исследования сильных ударных волн в разреженной плазме. Препринт 42 ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 1966.

/ 19 / Визирь В.А., Кузьмин В.Н., Петров Ю.К. Измерение импульсного магнитного поля в синхротроне индукционным методом. ПТЭ, № 2, 1963, 137.

/ 20 / Канунников В.Н., Шорин К.Н. Универсальный феррометр для измерения магнитного поля синхротрона. ПТЭ, № 3, 1956, 22.

/ 21 / Греков Н.Н., Рябов А.Н., Гольдин А.Л. Измерение поля магнитов ускорителей с жесткой фокусировкой. ПТЭ, № 2, 1956.

/ 22 / Алексеев А.Г. и др. Применение пермаллоевых датчиков для массовых магнитных измерений на протонном синхротроне. ПТЭ, № 4, 1962, 179.

/ 23 / Шорин К.Н., Метельников Ю.Н., Бозин Г.М., Еремин Л.В. Применение пермаллоевых датчиков при магнитных измерениях в ускорителях. ПТЭ, № 4, 1958, 25.

/ 24 / *Kelly J.M. Rev. Scient. Instrum., 22, 1951, 256.*

/ 25 / Курочкин С.С. Магнитные измерения с пермаллоевыми датчиками в синхрофазотроне. ПТЭ, № 1, 1958, 53.

/ 26 / Радкевич И.А., Талызин А.Н. ПТЭ, № 4, 1961, 169.

/ 27 / Радкевич И.А. ПТЭ, № 4, 1962, 229.

/ 28 / Мозин И.В., Смирнов В.П., Сотников Л.Б. Пермаллоевые датчики магнитного поля. Сб. Электрофизическая аппаратура, вып.1, 1963, Госатомиздат, стр.76.

/ 29 / Куркин Ю.Л., Куркина Н.С., Мадонашвили Р.Д. Прибор для измерения напряженности импульсных магнитных полей ПТЭ, № 6, 1960, 122.

/ 30 / Нестеренко А.Д., Февралев Н.Е., Таранов С.Г., Брайко В.В. Прибор для измерения индукции переменных магнитных полей. Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах. УССР, вып.1, ИНТИ, Киев, 1965.

/ 31 / Таранов С.Г., Ганченко Л.Т. Измеритель напряженности переменных магнитных полей. Передовой научно-технический и производственный опыт, 1963, № 34-63-358/3 (ГОСИНТИ).

/ 32 / *Gauss Meter* Type MM-11, prospect японской фирмы *Yokogawa Electric Works.*

/ 33 / *Grave H.F. Messung magnetischer Felder.*

Elektro-Anzeiger Ausg. ges. Ind., 19, N33, 1966, 432.

- 1 34 / Hall-effect Gaussmeter. *Electr. Equipm.*, 6, №2, 1966, 15.
- 1 35 / Gaussmeter. *Electronics*, 38, №12, 1965, 156.
- 1 36 / Гаузмeтер. *Индустриe-Анзeигeр*, №83, 89, 1967, 19.
- 1 37 / Milligan N.P., Burgess James P. Hall-effect devices for low level magnetic detection. *Solid-State Electron*, 7, №5, 1964, 323.
- 1 38 / Wieder Harry H. Hall-effect stroboscope and magnetometer. *Изм. СММ*, кл. 324-45, №3, 223. 924. опыд. 14/хII - 1965.
- 1 39 / Богомолов В.Н. Устройства с датчиками Холла и датчиками магнитосопротивления. Госэнергоиздат, № 1-Л, 1961.
- 1 40 / R. Wetzel. Zur Erzeugung und Bestimmung von magnetischen Impulsfeldern. *Exptl. Techn. Phys.*, 12, №4, 1964, 259.
- 1 41 / Mc. Cartan J., Barrault M.R. An optical magnetic probe. *J. Scient. Instrum.*, 44, №4, 1967, 265.
- 1 42 / Hebert R.S., Schwei L.J. Thin film magnetoresistance Magnetometer. *Rev. Scient. Instrum.*, 37, №10, 1966, 1321.
- 1 43 / Yarn W.B., Caird R.S. Technique for measuring megagauss magnetic field Zeeman-effect. *Rev. Scient. Instrument*, 37, №6, 1966, 762.

- 44 / Hübner Klaus. Measurement of magnetic fields in a plasma using the Zeeman-effect. *Comptes rend VI-e Conf. internat. phénomènes ionisat. gaz. Paris, 1963, vol 4*, Paris, 1963, 31.

139 / ...
 140 / ...
 141 / ...
 142 / ...
 143 / ...

Ответственный за выпуск Н.С.Бабенко.
 Подписано к печати 20.11.68
 Усл. 1,5 печ.л., тираж 150 экз.
 Заказ № 258, бесплатно.

Отпечатано на ротэпринте в ИЯФ СО АН СССР, ИВ.