

Колебания фронтов свечения и наклонные полосы внутри сжатой области наблюдаются не только в первом полупериоде разрядов, но также и в последующих. Как и следовало ожидать, наклон полос в этих полупериодах уменьшается, что свидетельствует об одновременном уменьшении скорости звука и температуры плазмы. Например, во втором полупериоде разряда емкости в 200 мкф температура в максимуме, измеренная указанным способом, поднимается только до 8000 К°.

Таким образом, развитые представления о структуре разрядного облака при режимах разряда, когда электродные факелы являются сверхзвуковыми, делают возможным простой метод определения его температуры по измерению скорости распространения звуковых возмущений, регистрируемых на временных развертках. Предлагаемый метод позволяет проводить измерения температуры с временным разрешением.

Поступила 18 VIII 1965

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Султанов М. А., Киселевский Л. И. Исследование механизма поступления вещества электродов при импульсном высоковольтном разряде. Ж. прикл. спектроскопии, 1964, т. 1, стр. 268.
2. Бабушкин А. О свечении паров конденсированного разряда, истекающих из сопла трубки. Ж. эксперим. и теор. физ., 1944, т. 14, стр. 184.
3. Гречихин Л. И., Минько Л. Я. О структуре плазменной струи импульсного разряда. Ж. техн. физ., 1962, т. 32, стр. 1072.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. Гостехиздат, 1953.
5. Бабушкин А. О температуре, степени ионизации и давлении паров в конденсированном разряде через канал узкой трубки. Ж. эксперим. и теор. физ., 1944, т. 14, стр. 279.

#### ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ

И. Б. Болотин (Ленинград)

В работе [1] описаны некоторые способы, обеспечивающие измерение колебаний малой амплитуды с применением эффекта Холла. Ниже описывается устройство, измеряющее колебания большей амплитуды и широкого диапазона частот. Определены условия и требования к магнитной системе с равномерно изменяющимся в направлении колебаний магнитным полем, обеспечивающие точность измерения. Приведены примеры практического применения датчика.

**1. Методика измерения и расчетные соотношения.** Известно, что датчик Холла реагирует на напряженность магнитного поля в той части пространства, в которой он находится в данный момент. Очевидно, что использование его для целей измерения вибраций вызывает необходимость применения магнитного поля, пространственно неоднородного по направлению перемещения датчика. Если датчик перемещается в направлении  $y$ , то поле должно иметь некоторую функцию  $H(y)$ .

Как известно, процессы в датчике Холла определяются выражением [2]

$$E_y = k E_x H \quad (1.1)$$

Здесь  $E_x$  — напряженность продольного электрического поля в датчике,  $E_y$  — напряженность поперечного электрического поля в датчике,  $H$  — напряженность магнитного поля,  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Пусть датчик (фиг. 1) расположен в плоскости  $xy$  и пронизывается магнитным полем, ориентированным по оси  $z$ . Поле неоднородно в направлении  $y$  и описывается выражением

$$H = H(y) \quad (1.2)$$

Суммарное выходное напряжение неподвижного датчика, расположенного в таком поле, определяется выражением

$$U_{y\Sigma} = k E_x \int_{y-\frac{1}{2}b}^{y+\frac{1}{2}b} H(y) dy \quad (1.3)$$

Фиг. 1. Расположение датчика Холла в системе координат  $xyz$

В случае перемещения датчика в плоскости  $xy$  по закону  $y = f(t)$  выражение (1.3) принимает вид

$$U_{y\Sigma} = k E_x \int_{f(t)-\frac{1}{2}b}^{f(t)+\frac{1}{2}b} H(y) dy \quad (1.4)$$

Очевидно, что

$$U_{y\Sigma} = U_{y0} + U_y \quad (1.5)$$

Здесь  $U_{y0}$  — составляющая выходного напряжения, соответствующая первоначальному положению покоя датчика;  $U_y$  — составляющая выходного напряжения появившаяся в связи с перемещением датчика.

Условием, необходимым для измерения, будет пропорциональная зависимость между полезным сигналом  $U_y$  и перемещением, т. е.

$$U_y = nf(t) \quad (1.6)$$

где  $n$  — коэффициент пропорциональности. Подставив (1.5) и (1.6) в (1.4), получим

$$U_{y0} + nf(t) = kE_x \int_{f(t)-1/2b}^{f(t)+1/2b} H(y) dy \quad (1.7)$$

Дифференцируем левую и правую части по  $t$

$$nf'(t) = kE_x f'(t) \{H[f(t) + 1/2b] - H[f(t) - 1/2b]\} \quad (1.8)$$

Учитывая  $y = f(t)$ , получим

$$H(y + 1/2b) - H(y - 1/2b) = \Delta H = n/kE_x \quad (1.9)$$

Равенство (1.9) имеет следующий смысл. Для того чтобы выходное напряжение датчика Холла  $U_y$  было пропорционально перемещению, магнитное поле должно быть таким, чтобы при любом  $y$  напряженности поля в точках, расположенных симметрично относительно  $y$  на расстоянии  $1/2b$ , отличались на постоянную величину  $\Delta H$ . Таким образом, поле должно иметь линейную зависимость в направлении измеряемого перемещения

$$H = H_0 + y |\text{grad} H| \quad (|\text{grad} H| = n/kE_x b) \quad (1.10)$$

Подставив (1.10) в (1.4), определим суммарное выходное напряжение датчика

$$U_{y\Sigma} = kE_x \int_{f(t)-1/2b}^{f(t)+1/2b} (H_0 + y |\text{grad} H|) dy \quad (1.11)$$

Проинтегрировав и преобразовав (1.11), получим

$$U_{y\Sigma} = kE_x b H_0 + kE_x b |\text{grad} H| f(t) \quad (1.12)$$

В соответствии с (1.5), первое слагаемое — выходное напряжение покоя  $U_{y0}$ , а второе слагаемое — полезный сигнал, пропорциональный измеряемому перемещению

$$U_y = kE_x b |\text{grad} H| f(t) \quad (1.13)$$

Выражение (1.13) можно преобразовать в более удобное для пользования

$$U_y = k_u U_x |\text{grad} H| f(t) = k_u I_x R_x |\text{grad} H| f(t) \quad (1.14)$$

Здесь  $k_u$  — так называемый коэффициент передачи по напряжению, характеризующий конкретный датчик Холла (его материал и габариты);  $U_x$  — входное напряжение, приложенное к токовым электродам датчика Холла, создающее продольную напряженность поля  $E_x$ ;  $R_x$  — входное сопротивление датчика Холла;  $I_x$  — управляющий ток.

Соответственно суммарное выходное напряжение будет

$$U_{y\Sigma} = k_u I_x R_x [H_0 + |\text{grad} H| f(t)] \quad (1.15)$$

Из (1.14) нетрудно вывести удобное расчетное выражение для определения величины  $|\text{grad} H|$ , необходимой для удовлетворения заданным условиям.

Пусть, например,  $f(t)$  — синусоидальная функция

$$f(t) = y_m \sin \omega t \quad (1.16)$$

Выходной сигнал должен быть также синусоидальной функцией напряжения с амплитудой  $U_{ym}$ . Поэтому в соответствии с (1.14),

$$U_{ym} = k_u U_x |\text{grad} H| y_m, \quad \text{или} \quad |\text{grad} H| = \frac{U_{ym}}{y_m k_u U_x} = \frac{U_{ym}}{y_m k_u I_x R_x} \quad (1.17)$$

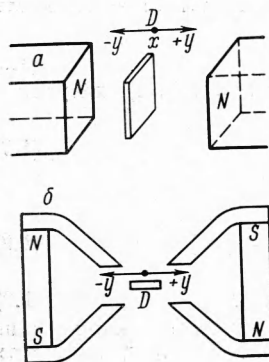
Таким образом, при помощи выражения (1.17) можно определить необходимый градиент магнитного поля для желаемых  $U_{ym}$  и  $y_m$ , используя имеющийся в наличии датчик Холла с конкретными параметрами  $k_u$ ,  $I_x$  и  $R_x$ .

Например, пусть имеется датчик э.д.с. Холла со следующими параметрами: коэффициент передачи (при  $H = 1$  э)  $k_u = 10^{-5}$  э<sup>-1</sup>, допустимая мощность рассеивания  $P_m = 0.1$  вт, входное сопротивление датчика  $R_x = 300$  ом.

Определим  $|\text{grad } H|$  поля, которое необходимо создать, чтобы при амплитуде перемещения  $y_m = 5 \text{ мм}$  датчик дал выходной сигнал с амплитудой  $U_{ym} = 50 \text{ мв}$ . Максимальное входное напряжение, допустимое по мощности рассеивания

$$U_{xm} = \sqrt{P_m R_x} = 5.5 \text{ в}$$

Примем  $U_x = 5 \text{ в}$ . Из (1.17) получим  $|\text{grad } H| = 50 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-5} \cdot 5 = 200 \text{ а/мм}$ .

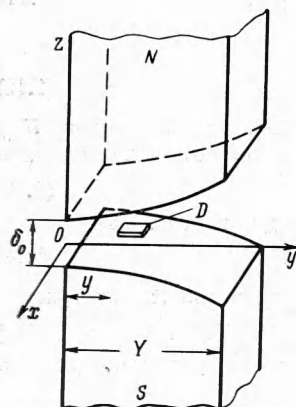


Фиг. 2. Способы создания линейно изменяющегося магнитного поля

Магнитное поле, равномерно изменяющееся в направлении измеряемого перемещения, может быть создано различными способами, например, при помощи постоянных керамических магнитов, направленных один к другому одноименными полюсами [1]. В этом случае на некотором участке пространства между полюсами создается зона с постоянным градиентом (фиг. 2, а). Зону с постоянным градиентом можно также создать при помощи специально изготовленной системы магнитов (фиг. 2, б). Однако наиболее простым и удобным для применения является способ создания магнитного поля с постоянным градиентом при помощи полюсных наконечников специальной формы (фиг. 3)<sup>1</sup>, зазор между которыми является переменной величиной. Можно показать, что для получения равномерно изменяющегося магнитного поля с заданным  $|\text{grad } H|$  зазор должен изменяться по закону

$$\delta_y = \frac{\delta_0 Y}{Y + y \alpha_n}, \quad \alpha_n = \frac{Y |\text{grad } H|}{H_0} \quad (1.18)$$

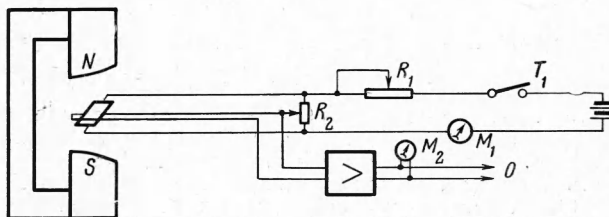
Здесь  $\delta_0$  — зазор, соответствующий началу координат;  $\delta_y$  — зазор, соответствующий точке, отстоящей от начала координат на расстоянии  $y$ ;  $Y$  — ширина полюсного наконечника в направлении измеряемого перемещения;  $H_0$  — напряженность магнитного поля в точке, соответствующей началу координат;  $\alpha_n$  — коэффициент, характеризующий полный перепад напряженности поля по длине  $Y$ .



Фиг. 3

Фиг. 3. Датчик Холла в поле магнита с полюсными наконечниками специального профиля

Достоинство этого метода заключается также в том, что, применяя полюсные наконечники разной длины  $Y$ , можно обеспечить измерение перемещений практически любой амплитуды. Следует лишь учесть влияние краевого эффекта. Практически между амплитудой перемещения датчика  $y_m$  и шириной полюсного наконечника должно быть соотношение  $Y \geq 2y_m + 3$  (в мм).



Фиг. 4

Фиг. 4. Электрическая схема измерительного устройства

**2. Принципиальная схема измерения.** Схема измерительного устройства приведена на фиг. 4. В зазоре магнита  $D$  — датчик Холла  $D$ , укрепленный на объекте, перемещение которого измеряется. Плоскость датчика Холла перпендикулярна вектору напряженности поля  $H$ . Датчик Холла подсоединяется к измерительному устройству четырехжильным кабелем. При помощи реостата  $R_1$  и миллиамперметра  $M_1$  устанавливается управляющий ток датчика, регулирующий его чувствительность. Потенциометр  $R_2$  служит для настройки эквипотенциальности датчика Холла. При его помощи компенсируется также составляющая выходного напряжения  $U_{y_0}$ , соответствующая, согласно (1.5) и (1.12), первоначальному положению покоя датчика. Выходное напряжение, получаемое с холловских электродов датчика, пропорциональное мгновенному значению вибрационного перемещения, подается на шлейф осциллографа либо непосредственно, либо, в случае малого сигнала, — через усилитель. Амплитуда вибрации может измеряться при помощи стрелочного прибора  $M_2$ .

<sup>1</sup> Болотин И. В., Константинов Е. А. Авторское свидетельство № 183416 от 4 марта 1965 г.

3. Компенсация паразитной э. д. с., наводимой в цепях датчика Холла при перемещении в магнитном поле. В датчике Холла, перемещающемся в магнитном поле, возникает не только поперечная э. д. с. Холла, представляющая собой полезный сигнал, пропорциональный перемещению. При пересечении магнитного потока в цепях датчика Холла наводится также и паразитная э. д. с. индукции. Величина ее имеет тот же порядок, что полезная э. д. с. Холла, и зависит от геометрических размеров датчика, от конструктивного расположения токоведущих цепей, подсоединенных к его электродам, а также от скорости перемещения датчика в магнитном поле. Цепи датчика Холла образуют два контура: выходной цепи и цепи управляющего тока; напряжение, появляющееся на выходных электродах датчика, перемещающегося в неоднородном магнитном поле с постоянным градиентом, с учетом паразитных наводок составит

$$U_{y\Sigma} = k_u R_x I_x H_0 + k_u R_x I_x y |\text{grad } H| - k_u \frac{R_x}{R_1} s_1 H_0 |\text{grad } B| \frac{dy}{dt} - k_u \frac{R_x}{R_1} s_1 |\text{grad } H| |\text{grad } B| y \frac{dy}{dt} - s_2 |\text{grad}^2 B| \frac{dy}{dt} \quad (3.1)$$

Здесь  $|\text{grad } B| = \mu_0 |\text{grad } H|$  — градиент индукции в зазоре,  $\mu_0$  — магнитная проницаемость воздуха,  $s_1$  — площадь контура цепи управляющего тока,  $s_2$  — площадь контура выходной цепи,  $R_1$  — суммарное сопротивление цепи управляющего тока.

Выражение (3.1) состоит из пяти слагаемых: первое — постоянная составляющая покоя, которая компенсируется при настройке эквипотенциальности; второе — полезный сигнал; остальные слагаемые представляют паразитные напряжения наводок  $\Delta U$ , пропорциональные скорости перемещения.

Для случая  $y = y_m \sin \omega t$  выражение для выходного напряжения (без учета первого слагаемого постоянной составляющей) после преобразований имеет вид

$$U_{y\Sigma} = U_{ym} (\sin \omega t - A_1 \cos \omega t - A_2 \cos \omega t - A_3 \sin 2\omega t) \quad (3.2)$$

$$A_1 = \frac{s_2 \omega \mu_0}{k_u R_x I_x}, \quad A_2 = \frac{s_1 \omega B_0}{I_x R_1}, \quad A_3 = \frac{s_1 \omega |\text{grad } B| y_m}{2 I_x R_1} \quad (3.3)$$

$$U_{ym} = k_u I_x R_x |\text{grad } H| y_m$$

т. е. наводка состоит из составляющих одинарной и двойной частот по отношению к частоте вибрации. Оценим величины  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  для датчика и магнитного поля, имеющих параметры, рассмотренные в примере, Примем  $R_1 \approx R_x$

$$I_x R_x = U_x = 5 \text{ в}, \quad k_u = 10^{-5} \text{ в}^{-1}, \quad |\text{grad } B| = 200 \text{ в} / \text{мм} = 200 \cdot 10^{-8} \text{ в} \cdot \text{сек} / \text{см}^2 \cdot \text{мм}$$

$$\mu_0 = 0.4\pi \cdot 10^{-8} \text{ в} \cdot \text{сек} / \text{см}, \quad B_0 = 6000 \text{ в} = 6000 \cdot 10^{-8} \text{ в} \cdot \text{сек} / \text{см}^2, \quad y_m = 5 \text{ мм}$$

Для этих параметров получим ( $s_1$  и  $s_2$  — в  $\text{см}^2$ ,  $\omega = 2\pi f$  — в  $\text{сек}^{-1}$ ).

$$A_1 = 2 \cdot 10^{-4} s_2 \omega, \quad A_2 = 12 \cdot 10^{-6} s_1 \omega, \quad A_3 = 1 \cdot 10^{-6} s_1 \omega \quad (3.4)$$

Поскольку  $s_1$  и  $s_2$  — величины одного порядка, то анализ выражения (3.4) показывает, что составляющими  $A_2$  и  $A_3$  наводок можно пренебречь по сравнению с  $A_1$  и полезным сигналом, т. е. следует учитывать только наводку на выходной контур.

Анализ выражения (3.3) показывает, что для уменьшения влияния наводки целесообразно применять высокоомные датчики Холла с большим коэффициентом передачи по напряжению. Электрические цепи от электродов должны выполняться бифилярно, с минимальными площадями контуров  $s_1$  и, особенно,  $s_2$ . В этом случае для частот порядка 50—100  $\text{гц}$  наводками можно пренебречь. Для больших частот вибраций наводки могут быть недопустимо большой величины, так как они пропорциональны частоте. В этом случае следует принять меры по компенсации паразитных наводок.

Паразитные наводки на выходную цепь могут успешно компенсироваться встречным витком, площадь которого подбирается экспериментально при изготовлении прибора. Паразитные наводки на токовый контур подавляются применением большого сопротивления  $R_1$  при соответствующем повышении напряжения питания. Пример такой компенсации приведен в [3].

Поступила 10 I 1966

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Nalesz M., Ziomecki H. A Hall effect accelerometer. J. Franklin Inst., 1963, vol. 276, No. 1, p 14—25.
2. Жузе В. П., Регель А. Р. Техническое применение эффекта Холла. Изд. Лен-го Дома научно-техн. пропаганды, 1957.
3. Болотин И. Б. Применение датчика Холла для осциллографирования больших переменных токов при испытаниях коммутационной аппаратуры. Электричество, 1962, № 1.