Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института
им.Г.В.Плеханова, т. XVIII, вып. 1, 1958 г.

КОМПЕНСАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА ВЛАЖНОСТИ В СХЕМАХ Г-МЕТРОВ

В.Г.Валеев, Е.С.Кричевский, А.Ф.Авдеева

В резонансных методах контроля влажности емкостный датчик с исследуемым материалом в ряде случаев включается в колебательный контур автогенератора. Изменение влажности W контролируемого материала приводит к перестройке резонансного контура в анодно-сеточной цепи генератора, что вызывает некоторое приращение величины генерируемой частоты. Приращение частоты автогенератора преобразуется с помощью частотных дискриминаторов в постоянное напряжение, которое поступает на измерительный прибор. Недостатком рассмотренного метода контроля влажности является зависимость рабочей частоты автогенератора от величины диэлектрических потерь в контролируемом материале. При больших диэлектрических потерях погрешность измерения влажности может достигнуть значительных величин. Этот недостаток и ограничивает применение высокочувствительных резонансных методов.

Для оценки влияния потерь в измерительном конденсаторе на рабочую частоту рассмотрим уравнение баланса фаз Я.Грошковского[x] для обобщенной схемы автогенератора

$$\operatorname{Im}\left[\frac{Z_a(Z_g + Z_{ag})}{Z_a + Z_g + Z_{ag}}\left(1 + K\frac{Z_g}{Z_g + Z_{ag}}\right)\right] = 0, \qquad (1)$$

где Z_a, Z_g и Z_{ag} – комплексные сопротивления соответственно между анодом–катодом, сеткой–катодом и анодом–сеткой усилительной лампы;

K – коэффициент усиления лампы.

[x] Я.Грошковский. Генерирование высокочастотных колебаний и стабилизация частоты. М., ИЛ, 1953.

113620

ЛГИ Библиотека

Для автогенераторов, выполненных на усилительном каскаде с обратной связью, справедливо неравенство

$$K\frac{Z_g}{Z_g + Z_{ag}} \gg 1 . \qquad (2)$$

Неравенство (2) обусловлено тем, что величина Z_g должна быть одного порядка с Z_{ag} для обеспечения баланса амплитуд в автогенераторе. Используя это неравенство, можно получить приближенное уравнение баланса фаз,[x] широко используемое при анализе автогенераторов:

$$\mathrm{Im}\left(\frac{Z_a Z_g}{Z_a + Z_g + Z_{ag}}\right) = 0 . \qquad (3)$$

Применим уравнение (3) для основных типов автогенераторов, предполагая, что эквивалентная электрическая схема датчика состоит из параллельно включенных конденсатора и сопротивления.

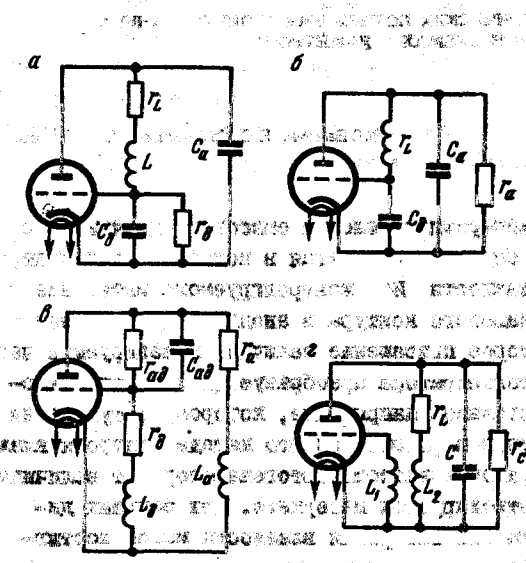


Рис. 1. Эквивалентная схема автогенератора по трехточечной схеме: а – с датчиком в цепи сетка-катод; б – с датчиком в цепи анод-катод; в – с датчиком в цепи анод-сетка; г – с трансформаторной связью

Для схем автогенераторов, изображенных на рис. 1а,б, уравнения баланса фаз совпадают при замене в них C_a на C_g и r_a на r_g :

$$\mathrm{Im}\left[\frac{\dfrac{r_g}{i\omega C_a\left(1+i\omega C_g r_g\right)}}{r_L+i\omega L+\dfrac{1}{i\omega C_a}+\dfrac{r_g}{1+i\omega C_g r_g}}\right]=0. \qquad (4)$$

После упрощающих преобразований для схемы 1,а получим

$$\omega=\omega_0\sqrt{1+\frac{r_L C_a}{r_g\left(C_g+C_a\right)}}, \qquad (5)$$

где $\omega_0=\sqrt{\dfrac{C_a+C_g}{L C_a C_g}}$,

где ω – циклическая частота генератора; ω_0 – циклическая частота при отсутствии потерь в датчике.

Для схемы 1,б имеем соответственно

[x] Б.М.Бетин. Радиопередающие устройства. М., „Высшая школа", 1965.

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{r_L C_q}{r_a (C_a + C_q)}} \quad . \qquad (6)$$

Зависимости (5) и (6) можно привести к единому выражению

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{t_q \delta}{Q_L}} \quad , \qquad (7)$$

где $t_q\delta$ – тангенс угла потерь в датчике на частоте ω_0 ; Q_L – доб
ротность индуктивности на частоте ω_0 ;

$$t_q\delta = \frac{1}{r_q C_q \omega_0} \quad ; \qquad Q_L = \frac{\omega_0 L}{r_L} \quad .$$

Для схемы, приведенной на рис. 1,в, уравнение баланса фаз имеет вид

$$\mathrm{Im}\left[\frac{(r_q + i\omega L_q)(r_a + i\omega L_a)}{r_q + r_a + i\omega(L_a + L_q) + \frac{r_{aq}}{1 + i\omega C_{aq} r_{aq}}}\right] = 0 \; . \qquad (8$$

После упрощения получим

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{L_a + L_q}{C_{aq} r_{aq}^2}} \quad ,$$

либо в обобщенном виде

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - t_q^2 \delta} \quad , \qquad (9$$

где $t_q\delta$ определяется на частоте ω_0 .

При выводе уравнений (7) и (9) пренебрегалось шунтирующим действием на колебательный контур внутреннего сопротивления генератора. Уч внутреннего сопротивления генератора приводит к полученному Б.М.Бети ным уравнения

$$\omega = \omega_0' \sqrt{1 + \frac{r_K}{R_i'}} \quad ,$$

где ω_0' – частота при значении $R_i' = \infty$; r_K – сопротивление индук тивности контура; R_i' – приведенное сопротивление лампы.

Так как $R_i' \gg r_K$, то величина $\sqrt{1 + \frac{r_K}{R_i'}}$ практически мало отл чается от единицы.

В ряде случаев используется генератор с индуктивной (трансформа торной) обратной связью (рис.1,г). Тогда баланс фаз определяется ура нением

$$K = D\left(1 + \frac{R_i'}{Z_K}\right) \quad ,$$

где K – коэффициент обратной связи; Z_K – сопротивление анодно го контура;

$$K = \frac{i\omega M}{r_L + i\omega L_K} \quad ; \qquad Z_K \simeq \frac{1}{\frac{1}{i\omega L} + i\omega C + \frac{1}{r_L}} \quad ;$$

D – проницаемость лампы; M – взаимная индуктивность.

Приравняв мнимую составляющую уравнения нулю, получим

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 + \frac{r_i}{R_i'}\left(1 + \frac{R_i'}{r_c}\right)} \simeq \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 + \frac{r_L}{r_c}} \qquad (10)$$

или

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{tg\delta}{Q_L}} ,$$

где

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} .$$

Формула (10) совпадает с уравнением (7). Из приведенного анализа можно сделать вывод об идентичном влиянии диэлектрических потерь материала на величину приращения частоты генерируемого напряжения для автогенераторов, приведенных на рис.1,а,б,г. Теперь, сравнивая выражения (7) и (9), можно утверждать, что при больших значениях тангенса угла потерь схему, приведенную на рис. 1,в, применять нецелесообразно.

Рассмотрим метод компенсации потерь емкостного датчика применительно к схемам, приведенным на рис.1,а,б,г. Величина $\alpha = tg\delta/Q_L$ обычно намного меньше единицы. Так, при $\alpha = 0{,}1$ и $Q_L = 200$ допустимая величина тангенса угла потерь $tg\delta = Q_L\alpha_1 = 20$.

Раскладываем выражение (7) в ряд Маклорена:

$$\omega_1 = \omega_0\left(1 + \frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha^2}{8} \cdots\right) . \qquad (11)$$

Отношение второго слагаемого к третьему равно $4/\alpha$ и при $\alpha = 0{,}1$ достигает 40. Следовательно, при $\alpha \leq 0{,}1$ можно ограничиться двумя членами ряда.

Смысл компенсации активных потерь датчика сводится к вычитанию из уравнения (11) второго члена ряда. Для этого необходимо ввести в схему влагомера второй идентичный автогенератор. В нем вместо емкостного преобразователя включается цепочка из параллельно соединенных постоянного по величине конденсатора и сопротивления, величина которого меняется пропорционально R_x. Частота колебаний опорного автогенератора

$$\omega_2 \simeq \omega_0'\left(1 + \frac{\alpha'}{2}\right) ,$$

где

$$\omega_0' = const .$$

Выходной сигнал частотного дискриминатора

$$u_д \sim (\omega_1 - \omega_2) = (\omega_0 - \omega_0') , \qquad (12)$$

причем $u_д$ в первом приближении уже не зависит от потерь в емкостном датчике. Для обеспечения компенсации необходимо использовать второй емкостный датчик, который включается в цепь преобразователя. Вы-

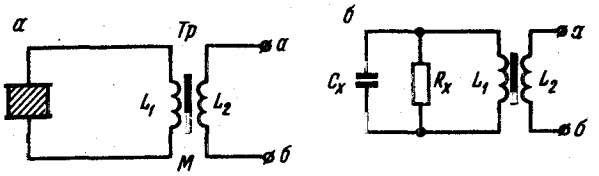


Рис. 2. Схемы включения датчика в трансформаторный преобразователь: а – принципиальная; б – эквивалентная электрическая

ходное активное сопротивление преобразователя должно изменяться пропорционально сопротивлению емкостного датчика, а реактивная составляющая сопротивления должна быть постоянна по величине (рис. 2).

Комплексное сопротивление в первичной цепи трансформатора

$$Z_1 = \frac{1}{i\omega C_x + \frac{1}{i\omega L_1} + \frac{1}{R_x}} .$$

Преобразуя параллельную цепь RC в последовательную, получим

$$R'_x = \frac{R_x}{1+\omega^2 R_x^2 C_x^2} ;$$
$$x' = -\frac{i\omega R_x^2 C_x}{1+\omega^2 R_x^2 C_x^2} . \qquad (13)$$

Систему связанных контуров можно заменить одним двухполюсником, в котором активная и реактивная составляющие комплексного сопротивления соответственно

$$R_2 = \frac{\omega^2 M^2 R_x}{R_x^2(\omega^2 L_1 C_x - 1)^2 + \omega^2 L_1^2} ;$$
$$x_2 = \omega L_2 - \frac{\omega^2 M^2 \left[\omega L_1 + R_x^2(\omega^2 L_1 C_x - 1)\omega C_x\right]}{R_x^2(\omega^2 L_1 C_x - 1)^2 + \omega^2 L_1^2} . \qquad (14)$$

Для преобразования последовательной цепочки в эквивалентную параллельную воспользуемся очевидными соотношениями

$$R_э = R_2\left(1 + \frac{x_2^2}{R_2^2}\right) ;$$
$$x_э = x_2\left(1 + \frac{R_2^2}{x_2^2}\right) . \qquad (15)$$

Из выражений (14) и (15) имеем

$$R_э = \frac{L_2}{L_1} R_x ; \qquad x_э = \frac{\omega L_2}{1-\omega^2 L_1 C_x} .$$

Теперь определим условия, при которых крутизна преобразования емкости C_x минимальна.

Выражение для отношения относительных приращений $R_э$ и $x_э$ имеет вид

$$\frac{\delta R_э}{\delta x_э} = \frac{1-\omega^2 L_1 C_x}{\omega^2 L_1 C_x} \cdot \frac{\delta R_x}{\delta C_x} ,$$

где δ – относительное приращение.

Значение коэффициента при $\delta R_x / \delta C_x$ максимально в случае $\omega^2 L_1 C_x \ll 1$. Отсюда $x_э \simeq \omega L_2$, т.е. реактивная составляющая комплексного сопротивления цепочки практически не зависит от величины C_x. При выполнении равенства $\alpha = \alpha'$ разность частот генераторов составит: для схем, приведенных на рис. 1,г и 3,

$$\omega_0 - \omega_0' = \frac{1}{\sqrt{LC_x}} - \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

а для схем на рис. 1,а,б

$$\omega_0 - \omega_0' = \sqrt{\frac{C_a + C_x}{LC_aC_x}} - \sqrt{\frac{C_a + C_q}{LC_aC_q}}.$$

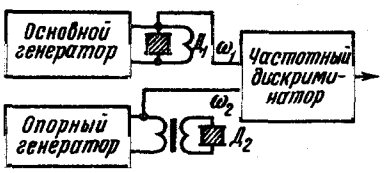


Рис. 3. Структурная схема влагомера

Величины емкостей C_1, C_a, C_q при этом постоянны.

Равенство $\alpha = \alpha'$ приближенное, так как в него входит значение емкости C_x, но крутизна зависимости $C_x(w)$ значительно меньше крутизны $R_x(w)$, что позволяет при выполнении $R_э = R_x$ в первом приближении компенсировать влияние активных потерь при изменении влажности материалов.

Зависимость выходного сопротивления $R_э$ системы связанных контуров ($L_1 = L_2 = 110$ мкГ; $k \simeq 1$) с включенной в первичную обмотку эквивалентной схемой датчика от величин R_x, C_x приведена на рис. 4. Из кривой зависимости следует: величина $R_э$ изменяется пропорционально R_x, причем при $R_x \leqslant 680$ Ом достаточно точно выполняется соотношение $R_э = R_x$. Разброс экспериментальных точек от теоретической зависимости находится в пределах погрешности использованных при эксперименте измерительных приборов. Изменение C_x в пределах 14–510 пФ практически не влияет на равенство $R_э = R_x$.

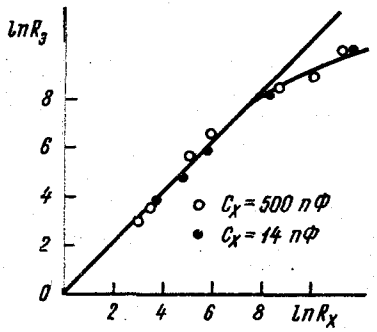


Рис. 4. Зависимость входного сопротивления трансформаторного преобразователя от активного сопротивления датчика

Влияние C_x на величину $C_э$ можно определить экспериментально. При изменении R_x от 0,2 до 240 кОм и C_x от 14 до 510 пФ отклонение величины выходной емкости $C_э$ не превышает $\pm 2{,}3\%$. Измерения проводились на частоте 200 кГц.

Выводы

1. Автогенераторы, выполненные по трехточечной схеме и используемые в высокочастотных влагомерах, описываются типичной зависимостью генерируемой частоты от величины активных потерь емкостного датчика, которую удобно представлять в виде степенного ряда.

2. Используя трансформаторный преобразователь, компенсирующий емкостную составляющую датчика в опорном генераторе, можно в значительной мере ослабить влияние диэлектрических потерь в материале на точность измерения влажности.