

РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ И ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВЛАГОМЕРОВ НА БАЗЕ ИЗМЕРИТЕЛЯ ЕМКОСТИ ТИПА Е12-1А

Э.А.Калым, В.Г.Валеев

При дискретном экспрессном контроле влажности дисперсных материа-

лов в ряде случаев используют устройст-
ва, выполненные на
базе прибора Е12-1А,
упрощенная схема ко-
торого показана на
рис. 1. Прибор со-
стоит из измери-
тельного генерато-
ра ИГ, в контур ко-
торого включается
емкостный преобра-
зователь C_x , и
опорного генерато-
ра с плавным изме-
нением частоты. Нап-
ряжения с генера-
торов через буфер-
ные катодные повто-
рители поступают
на смеситель. Пос-
ле фильтрации и
усиления напряе-
ние разностной час-
тоты подается на
индикатор разност-
ной частоты 6Е1П.
По величине раstra

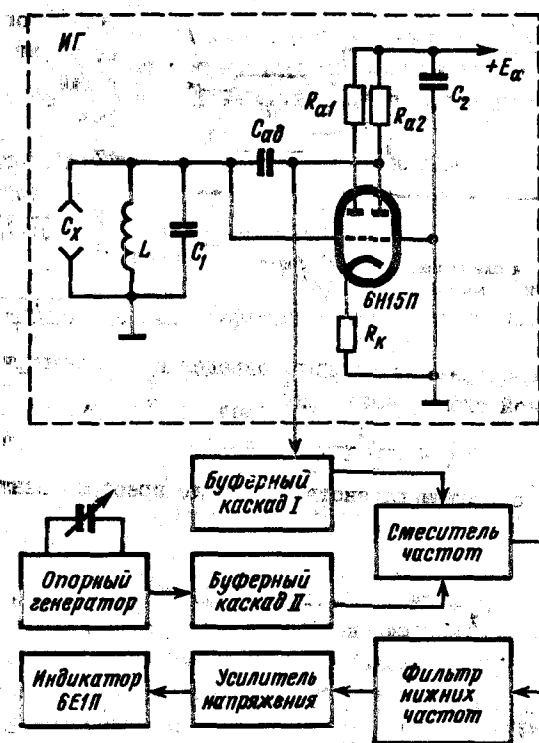


Рис. 1. Схема измерителя емкости Е12-1А

и частоте мерцания его на экране судят о разбалансе частот генераторов. Вследствие идентичности генераторов в момент совпадения их частот приращение кажущейся емкости датчика равно приращению емкости в контуре опорного генератора. Это позволяет по величине приращения, после соответствующей градуировки, определять влажность контролируемого материала. Диапазон измерений таких влагомеров лежит в области значений влажности, при которых тангенс угла диэлектрических потерь с пробой не превышает 0,1. Это ограничивает область применения влагомеров. Рассмотрим, каким образом можно расширить пределы измерения прибора.

Диапазон и точность измерений влажности материалов определяются не только конструкцией датчика, но и схемой измерительного генератора [2]. Генерируемая частота является функцией как реактивной, так и активной составляющей комплексного сопротивления датчика. В схеме генератора (рис. 2) точками a, c, k соответственно обозначены анод, сетка, катод усилительного каскада, собранного на правой половине лампы 6Н16П

(см. рис. 1). Несмотря на сложность цепи обратной связи можно показать, что генератор выполнен по трехточечной схеме [1], в которой

$$Z_a = R_a + \frac{1}{j\omega C_a};$$

$$Z_{aq} = \frac{1}{j\omega C_{aq}}; \quad (1)$$

$$Z_g = \frac{1}{1/R_x + 1/j\omega L + j\omega(C_g + C_x)}.$$

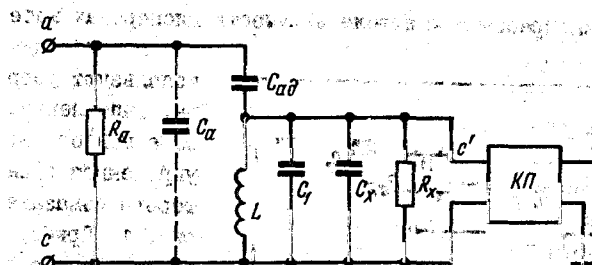


Рис. 2. Эквивалентная схема цепи обратной связи генераторного каскада Е12-1А

Уравнение баланса фаз, из которого определяется генерируемая частота для трехточечной схемы, имеет вид

$$\operatorname{Im} \left(\frac{Z_a Z_g}{Z_a + Z_g + Z_{aq}} \right) = 0. \quad (2)$$

Уравнение (2) с учетом равенств (1) после преобразования приводится к виду

$$\omega^2 \left(C_a + C_g + \frac{C_a C_g}{C_{aq}} \right) = \frac{1 + C_a/C_{aq}}{L} + \frac{1}{C_{aq} R_x R_a}, \quad (3)$$

где

$$C_g = C_{kx} + C_x.$$

Так как выполняются неравенства $C_g \gg C_a$, $C_{aq} \gg C_a$, а члены уравнения, в которые входит R_x , не содержат C_a , можно пренебречь влиянием паразитной емкости C_a на зависимость $\omega = \varphi(R_x)$. Тогда

$$\omega^2 \approx \frac{1}{LC_g} \left(1 + \frac{L}{C_{ag} R_x R_a} \right). \quad (4)$$

Величина измеряемой емкости определяется путем уравнивания частот измерительного и опорного генераторов, что позволяет уравнение (4) переписать в виде

$$\frac{1}{C_g + \Delta C_x} = \frac{1}{C_g} \left(1 + \frac{L}{C_{ag} R_x R_a} \right),$$

где ΔC_x — абсолютная погрешность измерения C_x , обусловленная электрическими потерями в материале.

Относительная погрешность измерения C_x

$$\left| \frac{\Delta C_x}{C_x} \right| = \frac{L(1 + \frac{C_1}{C_x})}{C_{ag} R_x R_a}. \quad (5)$$

При $R_x \rightarrow \infty$ относительная погрешность равна нулю.

При параметрах измерительной схемы и датчика $L = 50 \cdot 10^{-6}$ Г; $C_{ag} = 1000$ пФ; $C_g = 850$ пФ; $R_{a2} = 47$ кОм; $R_x = 3$ кОм; $C_x = 850$ пФ абсолютная погрешность $\Delta C_x = 0,6$ пФ, относительная $\left| \frac{\Delta C_x}{C_x} \right| = 0,6/850 = 0,07\%$.

Итак, чем шире диапазон изменения емкости датчика с пробой, тем меньше относительная погрешность от влияния потерь в материале. Для уменьшения погрешности измерений следует увеличивать C_{ag}, R_a и уменьшать C_1, L .

Условия возбуждения генератора определяются из соотношения баланса амплитуд

$$R_t + \operatorname{Re} \left[\frac{Z_d(Z_g + Z_{ag})}{Z_a + Z_g + Z_{ag}} \left(1 + \mu_y \frac{Z_g}{Z_g + Z_{ag}} \right) \right] = 0, \quad (6)$$

где μ_y — статический коэффициент усиления усилительного каскада генератора.

Если пренебречь паразитной емкостью C_a и предположить, что выполняется баланс фаз, то уравнение (6) в первом приближении представится в виде

$$|\mu| R_a = R_t \left[1 + \frac{R_a}{R_{x \min}} + \frac{\omega C_g - \frac{1}{\omega L}}{\omega C_{ag}} \right]; \quad (7)$$

$$\mu = \alpha \mu_y,$$

где α — коэффициент усиления катодного повторителя КП; $R_{x \min}$ минимальное значение шунтирующего резонансный контур активного сопротивления, при котором еще не срывается генерация.

Преобразуя правую часть выражения (7), учитывая уравнение баланса фаз и решая его относительно $R_{x \min}$, получим

$$R_{x \min} = \frac{1 + \frac{1}{\omega^2 C_{ag}^2 R_a^2}}{s - \frac{1}{R_a}}, \quad (8)$$

где $\mathcal{S}$ - результирующая крутизна лампы,

$$\mathcal{S} = \frac{|\mu|}{R_i} = |\alpha| \mathcal{S}_y ;$$

$\mathcal{S}_y$ - крутизна анодно-сеточной характеристики лампы в усилительном каскаде генератора.

Поскольку

$$\omega C_{ag} R_a \gg 1 ; \quad \mathcal{S} \gg \frac{1}{R_a} ,$$

уравнение (8) принимает вид

$$R_{x \min} \approx \frac{1}{\mathcal{S}} . \quad (9)$$

Чтобы расширить диапазон измерения влажности, нужно уменьшать граничные значения $R_{x \min}$, т.е. увеличивать $\mathcal{S}$. Последнее требование можно выполнить, если повысить коэффициент усиления катодного повторителя и крутизну лампы усилительного каскада. Известно, что $\alpha \approx \mathcal{S}_k R_k$, однако при больших значениях катодного сопротивления R_k снижается коэффициент усиления α катодного повторителя из-за падения μ_k . Следовательно, существует некоторое значение R_k , при котором α максимально. Аналогичные рассуждения справедливы и для усилительного каскада.

Таким образом, можно предположить, что для данного генератора, у которого R_k является общим для обоих каскадов и одновременно служит частью нагрузки усилительного, существует оптимальное значение R_k , при этом $R_{x \min}$ будет наименьшим. Очевидно, применяя двойные триоды с разделенными катодами либо отдельные лампы, можно подобрать наилучшие режимы для каждого каскада, тем самым еще более уменьшить величину $R_{x \min}$. Это подтверждается экспериментальной проверкой (табл.1). Связь между

Влияние параметров генераторной лампы на нагрузочные характеристики устройства

Тип лампы	Параметры каскадов генератора ^x					
	$\mathcal{S}$, мА/В (паспортные данные)	α	$\mathcal{S}_y$, мА/В	$\mathcal{S}_{\text{эк}}$, мА/В	$R_{x \min}$, кОм	$\frac{\Delta C_x}{C_x}$, %
6Н2П	2,1	0,36	1,33	0,48	4,0	0,42
	2,1	0,68	1,35	0,89	3,5	0,37
6Н1П	4,5	0,48	2,46	1,18	1,4	0,36
	4,5	0,59	3,0	1,77	1,25	0,4
6Н6П	11,0	0,40	3,0	1,2	1,45	0,83
	11,0	0,56	3,2	1,81	1,15	0,74
6Н23П	12,7	0,53	3,6	1,3	1,1	0,73
	12,7	0,67	4,0	1,48	0,97	0,67

^x В числителе - с общим резистором в катодах; в знаменателе - с разделенными катодами по постоянному току.

катодным повторителем и каскадом с заземленной сеткой для схем с катодами, разделенными по постоянному току, осуществляется посредством конденсатора емкостью 0,1–0,3 мкФ. Результаты эксперимента свидетельствуют о преимуществе схем, использующих лампы с разделенными катодами; такие схемы дают возможность нагружать контур меньшим R_x при сохранении вполне допустимого уровня погрешностей измерений.

Экспериментальные измерения проводились при постоянном значении $C_x = 100$ пФ. Значения $S_{\text{ис}}$ получены графическими расчетами, выполненными по данным рабочих точек лампы, объективно характеризующих рекомендуемые режимы. Данные табл. 1 подтверждают соотношение (9), т.е. что при увеличении крутизны уменьшается значение R_x , при котором происходит срыв колебаний; эта зависимость прослеживается для всех ламп.

Повышение результирующей крутизны лампы 6Н15П генератора приводит к уменьшению $R_{x \text{ min}}$. Значениям S , равным 0,7; 0,9 и 0,97 мА/В, соответствуют значения $R_{x \text{ min}}$, равные 0,4; 1,8 и 1,3 ком. При этом $\Delta C_x / C_x$ соответственно составит 2,08; 1,31 и 1,42%. Первые значения приведенных данных относятся к генератору измерителя емкости Е12-1А ($C_x = 100$ пФ). Таким образом, каскад следует ставить в режим максимального значения крутизны, подбирая соответствующие элементы схемы. Экспериментальные данные показывают: применяя в измерительном генераторе лампу с большой крутизной, можно значительно расширить диапазон измерения влагомера, выполненного на базе Е12-1А.

Расширить диапазон измерения влажности и уменьшить влияние потерь можно также за счет увеличения общего коэффициента усиления каскада, например, заменой катодного повторителя аperiodическим усилителем с анодной нагрузкой. Поскольку анодная нагрузка такой схемы чисто активная, входное сопротивление имеет емкостный характер и не вносит в контур дополнительных потерь. Увеличение коэффициента усиления в цепи обратной связи практически не влияет на баланс фаз. Реализовать этот способ удастся только при использовании лампы с разделенными катодами, причем для связи между каскадами необходима емкость около 1 мкФ. Relaxационные колебания исчезают при пунтировании R_x первого каскада конденсатором емкостью 5–10 тыс. пФ. На лампе 6Н1П удастся получить устойчивую непрерывную генерацию, срывающуюся при $R_x = 810$ Ом. Однако влияние R_x на ω недопустимо велико, требуются устройства компенсации активных потерь.

Рассмотрим случай больших электрических потерь в контролируемом материале. В этом случае уравнение баланса фаз используется в самом общем виде [1]:

$$\text{Im} \left\{ \frac{Z_a (Z_g + Z_{ag})}{Z_a + Z_g + Z_{ag}} \left(1 + \mu \frac{Z_g}{Z_g + Z_{ag}} \right) \right\} = 0. \quad (10)$$

Подставив в уравнение (10) соотношения (1) и пренебрегая слагаемыми высшего порядка малости, не зависящими от R_x получим

$$- \frac{1}{L C_g} \left(1 + \frac{1}{C_{ag} R_x R_a} + \frac{1}{C_{ag} R_x^2} \mu \right) = 0 \quad (11)$$

откуда следует, что при уменьшении R_x погрешность измерения C_x возрастает. Для ослабления влияния потерь необходимо увеличивать значения μ , C_{ag} , R_a .

В реальном генераторе, схема которого соответствует рис. 1, варьируя величинами R_k , R_a , C_{ag} , удается свести зависимость $\omega = \varphi(R_x)$ к минимуму в широком диапазоне R_x и для любого значения C_x . На рис. 3 шунтирующее контур активное сопротивление выражено в килоомах.

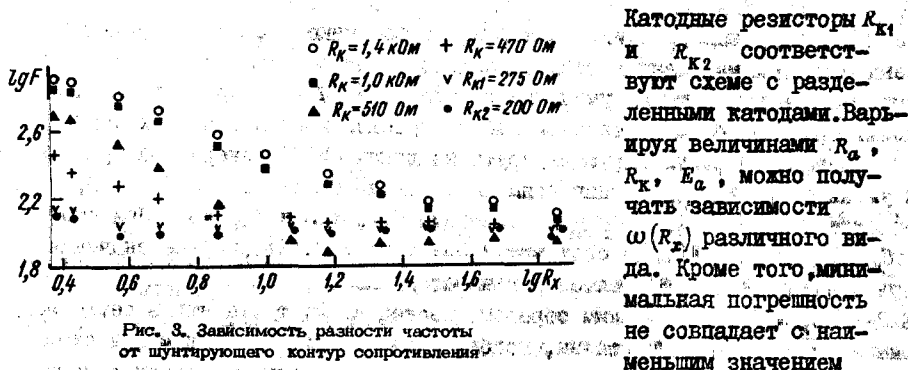


Рис. 3. Зависимость разности частоты от шунтирующего контур сопротивления

$R_{x \min}$. Выбор того или иного варианта определяется электрофизическими характеристиками контролируемого материала и специфическими требованиями к влагомеру.

Вариант измерительного генератора, выполненный по аналогичной рис. 1 схеме, но с разделенными катодами на двойном триоде 6Н23П (со следующими элементами схемы: $R_{a1} = 470 \text{ Ом}$; $R_{k1} = 360 \text{ Ом}$; $R_{a2} = 22 \text{ кОм}$; $R_{k2} = 270 \text{ Ом}$; $C_{ag} = 10 \text{ тыс. пФ}$; емкость связи между катодами $0,1 \text{ мкФ}$), был испытан в дискретном влагомере железного концентрата. В качестве датчика применялся емкостный преобразователь рассеянного поля с двумя кольцевыми электродами на дне бункера. Высота бункера 30 мм ; $C_0 = 5,1 \text{ пФ}$; удельное давление на пробу материала составило $0,19 \text{ кг/см}^2$. В испытаниях (табл. 2) датчик подключался к контуру измерительного генератора последовательно с конденсатором емкости 1000 пФ [3].

Таблица 2
Сравнительные испытания образцового и измененного измерителя емкости Е12-1А

Тип прибора	Усредненные значения емкости датчика с пробой (в делениях шкалы) при влажности железного концентрата, %												
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	7,0
Образцовый	9	30	62	103	153	212	-	-	-	-	-	-	-
Измененный	9	30	62	102	151	209	315	475	560	662	775	845	936

Разброс данных не выходит за пределы $\pm 0,07\%$ влажности. При непосредственном включении датчика у измененного варианта удается повысить верхний предел измерения влажности железного концентрата до $2,6\%$ против $0,72\%$ (заводской вариант) при равных условиях измерения.

При большом значении коэффициента преобразования $\partial W / \partial \sigma_x$ можно расширить диапазон измерения влажности дисперсных материалов включением емкостного датчика к части резонансного контура. Добротность контура при этом снижается в меньшей степени, что позволяет уменьшить $R_{x \min}$. Однако такой способ обладает недостатками: 1) снижается точность измерения влажности в начале диапазона вследствие нелинейности коэффициента преобразования $\partial W / \partial \sigma_x$ и снижения чувствительности к малым изменениям емкости датчика; 2) функциональная зависимость генерируемой частоты от потерь в датчике усложняется, что затрудняет компенсацию их влияния; 3) контур имеет несколько резонансных частот, и анализ генератора сложен.

Л и т е р а т у р а

1. Прошковский Я. Генерирование высокочастотных колебаний и стабилизация частоты. М., ИЛ, 1953.
2. Кричевский Е.С. Выход частоты высокочастотного генератора при обогащении полезных ископаемых. М., "Недра", 1972.
3. Кричевский Е.С., Кальм Э.А. Устройство для автоматического контроля влажности железного концентрата. - "Обогащение руд", 1969, № 1.