

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ РЕЗОНАНСНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ВЛАЖНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

д.т.н., проф. А.И. Овчаренко, М.В. Шапиро

*В настоящей статье предлагаются результаты теоретических и экспериментальных исследований резонансных измерительных преобразователей с индуктивными чувствительными элементами, объектов измерений и взаимодействий между ними при измерениях влажности сыпучих материалов.*

Применение резонансных измерительных преобразователей влажности и соответствующие исследования в основном связаны с емкостными чувствительными элементами [1, 2]. Вместе с тем в целом ряде случаев может оказаться, что индуктивные чувствительные элементы более технологичны, дешевы и надежны [3 - 5]. Для решения указанной задачи были выполнены экспериментальные исследования (рис.1). Последовательный

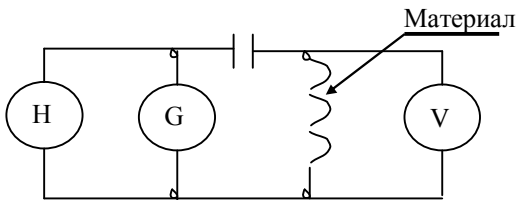


Рис.1. Упрощенная схема эксперимента

LC-контур питается от генератора высокой частоты (порядка 6 мГц). Чувствительный элемент выполнен в виде катушки этого контура. В индуктивный чувствительный элемент вносились различные материалы. В этом состоянии преобразователя фиксировалась новая резонансная частота (путем перестройки генератора до максимума показаний вольтметра) и новая добротность контура (в виде амплитуды напряжения на чувствительном элементе). Результаты измерений и вычислений эквивалентных RC - параметров для некоторых продуктов сведены в табл. 1.

Идентификационная гипотеза, выдвигаемая перед обработкой полученных данных (табл.1), состоит в предположении, что измеряемые продукты в качестве объекта измерений не могут иметь индуктивный характер. Таким образом, в предположении, что чувствительный элемент – индуктивный, а контурный конденсатор – высокодобротный, с достаточной для практики точностью справедлива модель измерений, представленная на рис. 2, где  $C_d$  - паразитная емкость катушки,  $C_p$ ,  $R_p$  - параметры модели измеряемого продукта. Модель оказывается слишком сложной для исследований в общем виде. Покажем это. Передаточная функ-

ция модели в отсутствии измеряемого продукта ( $C_p = 0$ ,  $R_p = \infty$ , точнее – равно сопротивлению воздуха) равна

$$W(s) = \frac{LCs^2 + rCs}{C_d CRLs^3 + (LC + LC_d + rRCC_d)s^2 + (rC + RC + rC_d)s + 1}. \quad (1)$$

Таблица 1

Результаты измерений и вычислений

№	Наименование продукта	Частота, кГц	Амплитуда, В	Идентифицированные параметры модели	
				R, Ом	C, пФ
1	Воздух	6517,4	97,11		
2	Подсолнечник 6,4%	6424,6	97,04	$\sim 10^9$	0,25
3	Подсолнечник 12,9%	6279,9	76,48	$5 \cdot 10^5$	0,67
4	Пшеница 6,75%	6359,6	97,02	$1,5 \cdot 10^7$	0,43
5	Пшеница 14,65%	6288,2	97,03	$0,72 \cdot 10^7$	0,64
6	Макароны 8,8%	6327,8	97,00	$10^7$	0,53
7	Макароны 14,0%	6299,6	97,01	$0,8 \cdot 10^7$	0,61

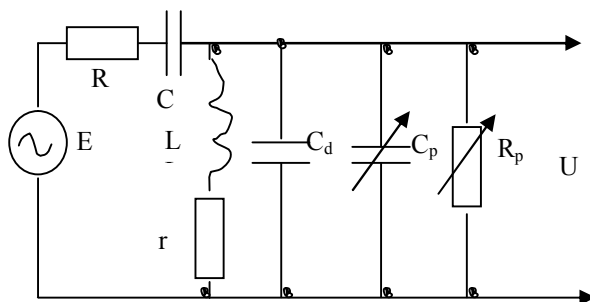


Рис.2. Модель преобразователя с индуктивным чувствительным элементом

Математическое описание модели преобразователя, как видно из (1), представляет уравнение третьего порядка. Это чрезвычайно затрудняет теоретические исследования в общих терминах, оставляя для исследований лишь путь численных расчетов, т.е. исследование конкретных устройств. Поэтому предлагается путь понижения порядка модели, связанный с использованием LR-модели измеряемого вещества и последовательной схемой взаимодействия преобразователя и измеряемого вещества. Такой путь оправдан с одной стороны, эквивалентными преобразованиями в цепях переменного тока, а с другой – феноменологическим характером моделей измеряемых продуктов [6]. Поэтому далее вместо модели (рис. 2) рассматривается модель вида (рис. 3).

Передаточная функция преобразователя без измеряемого продукта (нижнее положение переключателя S) равна

$$W(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{sL+r}{sL+(r+R)+\frac{1}{sC}} = \frac{T_1s(T_2s+1)}{T^2s^2+2T\xi s+1}, \quad (2)$$

где  $T_1 = rC$ ;  $T_2 = L/r$ ;  $T = \sqrt{LC}$ ;  $\xi = \frac{(r+R)}{2} \sqrt{C/L}$

при резонансе  $\omega_0 L = 1/\omega_0 C$  и  $\xi = \left(\frac{R}{r} + 1\right) / 2Q$ , где  $Q = \omega_0 L/r$  - добротность катушки.

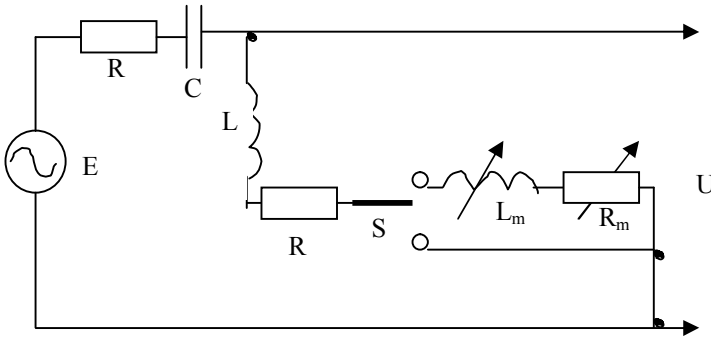


Рис. 3. Модель преобразователя с LR-моделью материала

Определим, какие же реальные значения в практике проектирования преобразователей может иметь коэффициент демпфирования  $Q$ . На рис.4 приведены значения этого коэффициента в функции  $R/r$  и  $Q$ . Шкалы абсцисс и ординат - логарифмические. Верхняя кривая соответствует низким значениям добротности ( $Q = 50$ ), средняя - средним ( $Q = 250$ ), а нижняя - высоким ( $Q = 500$ ).

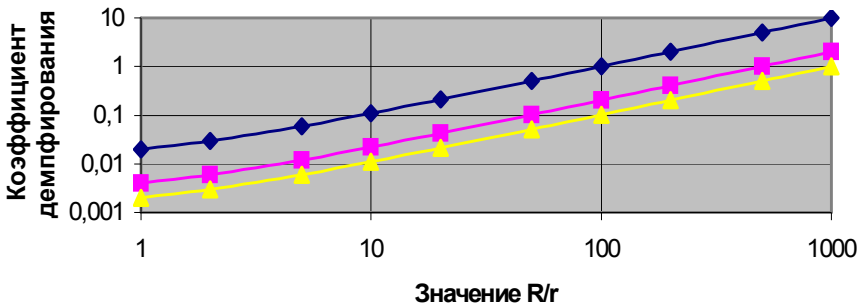


Рис. 4. Зависимость коэффициента демпфирования от  $R/r$  и  $Q$

Отметим, что приведенные логарифмические зависимости очень хорошо аппроксимируются линейными функциями, начиная со значений  $R/r > 3$ . Это

позволяет существенно упростить практические расчеты резонансных преобразователей.

По графику (рис. 4) можно сделать вывод о том, что в практике проектирования промышленных высокочастотных индуктивных первичных преобразователей ( $Q > 250$ ,  $R/r < 100$ ) коэффициент демпфирования остается меньшим единицы. Это означает, что знаменатель (2) нельзя разложить (привести к двум последовательно соединенным апериодическим звеньям). Таким образом, дальнейшему исследованию подлежит непосредственно передаточная функция (2). Частотная передаточная функция, соответствующая (2), равна

$$W(\omega) = \frac{[\omega^2 T_1 T_2 (\omega^2 T^2 - 1) + 2\omega^2 \xi T_1 T] + j[\omega T_1 (1 - \omega^2 T^2) + 2\xi \omega^3 T_1 T_2 T]}{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2 T^2} \quad (3)$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), соответствующая (3), имеет вид

$$A(\omega) = \frac{\sqrt{\omega^4 [T_1 T_2 (\omega^2 T^2 - 1) + 2\xi T_1 T]^2 + \omega^2 [T_1 (1 - \omega^2 T^2) + 2\xi \omega^2 T_1 T_2 T]^2}}{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2 T^2} \quad (4)$$

При резонансе  $\omega_0 T = 1$  и АЧХ в точке максимума равна

$$A(\omega_0) = \frac{\sqrt{1 + r^2 C/L}}{2\xi} \quad (5)$$

При внесении влажного продукта (верхнее положение переключателя S на рис. 3) параметры чувствительного элемента меняются:  $L^* = L + L_m$ ,  $r^* = r + r_m$ . Поэтому вместо формулы (4) теперь имеем

$$A^*(\omega_0) = \frac{\sqrt{\omega_0^4 [T_1^* T_2^* (\omega_0^2 T^{*2} - 1) + 2\xi^* T_1^* T^*]^2 + \omega_0^2 [T_1^* (1 - \omega_0^2 T^{*2}) + 2\xi^* \omega_0^2 T_1^* T_2^* T^*]^2}}{(1 - \omega_0^2 T^{*2})^2 + 4\xi^{*2} \omega_0^2 T^{*2}}, \quad (6)$$

где  $T^* = \sqrt{L^* C}$ ;  $T_1^* = r^* C$ ;  $T_2^* = r^* / L$ ;  $\xi^* = \frac{r^* + R}{2} \sqrt{C/L^*}$ .

Функция (6) сложна для исследований. Поэтому примем достаточно распространенный прием, заключающийся в аппроксимации  $\omega_0 T^* \approx 1$ . Фактически указанная аппроксимация отражает режим малых отклонений от резонансной рабочей точки. Именно с такими режимами приходится иметь дело при измерении влажности сыпучих продуктов в диапазоне 5...30% влажности. Теперь вместо (6) по аналогии с (5) можно записать

$$A^*(\omega_0) \approx \frac{\sqrt{1+r^{*2}C/L^*}}{2\xi^*}. \quad (7)$$

Функция преобразования может быть записана как зависимость модуля разности выходных напряжений до внесения продукта и после его внесения и с учетом (5) и (7) приобретает вид

$$\Delta U[(r-r^*), (L-L^*)] = |A(\omega_0) - A^*(\omega_0)| = \left| \frac{\sqrt{1-r^2C/L}}{2\xi} - \frac{\sqrt{1-r^{*2}C/L^*}}{2\xi^*} \right|. \quad (8)$$

Как показали эксперименты, для многих материалов возможно допущение  $\xi \approx \xi^*$ . Тогда вместо (8) для RL-модели продукта можно записать

$$\Delta U[(r-r^*), (L-L^*)] \approx \left| \frac{\sqrt{1-r^2C/L} - \sqrt{1-r^{*2}C/L^*}}{2\xi} \right|. \quad (9)$$

Для материалов, описываемых R-феноменологической моделью, функция преобразования равна

$$\Delta U[(r-r^*)] \approx \left| \frac{\sqrt{1-r^2C/L} - \sqrt{1-r^{*2}C/L}}{2\xi} \right|. \quad (10)$$

Для материалов, описываемых L-феноменологической моделью, функция преобразования равна

$$\Delta U[(L-L^*)] \approx \left| \frac{\sqrt{1-r^2C/L} - \sqrt{1-r^2C/L^*}}{2\xi} \right|. \quad (11)$$

Все три функции преобразования, как следует из выражений (9), (10), (11), нелинейны. Исследование характера нелинейности представляется целесообразным в тех случаях, когда функциональная связь между непосредственно измеряемым параметром и модельными значениями индуктивности и активного сопротивления чувствительного элемента детерминирована. В нашем случае такое исследование смысла не имеет. Из выражений (9), (10), (11) для функций преобразования определим чувствительности для различных феноменологических моделей продукта:

- для RL-модели

$$S_{RC} = \Delta U[(r-r^*), (L-L^*)] / (L-L^*) \approx \left| \frac{\sqrt{1-r^2C/L} - \sqrt{1-r^{*2}C/L^*}}{2\xi} \right| / (L-L^*); \quad (12)$$

- для R-модели

$$S_R = \Delta U[(r - r^*)]/(r - r^*) \approx \left| \frac{\sqrt{1 - r^2 C/L} - \sqrt{1 - r^{*2} C/L}}{2\xi} / (r - r^*) \right|; \quad (13)$$

- для L-модели

$$S_L = \Delta U[(L - L^*)]/(L - L^*) \approx \left| \frac{\sqrt{1 - r^2 C/L} - \sqrt{1 - r^2 C/L^*}}{2\xi} / (L - L^*) \right|. \quad (14)$$

Выполненные исследования позволили разработать инженерную методику проектирования резонансных измерительных преобразователей влажности сыпучих материалов с индуктивными чувствительными элементами. Методика использована при проектировании серийно выпускаемых влагомеров ВАП-1, ВЦЛ-11, ВЦЛ-11М, ВЦЛ-12, ВЦЛ-12М.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов / Кричевский Е.С., Бензарь В.К., Венедиктов М.В. – М.: Энергия, 1980. – 240 с.
2. Берлинер М.А. Измерение влажности. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
3. Овчаренко О.І., Губін М.В., Мигуценко Р.П., Сулима В.В. Пристрій вимірювання вологості. Патент №259 України, 25.12.1998.
4. Мигуценко Р.П. Овчаренко А.И. Исследование модели электромагнитного преобразователя влажности сыпучих материалов. // Український метрологічний журнал. – 1999. – №2. – С. 27 - 31.
5. Щапов П.Ф., Овчаренко А.И., Мигуценко Р.П. Оценка метрологических характеристик электромагнитного преобразователя влажности // Український метрологічний журнал. – 1999. – №3. – С. 31 - 34.
6. Хиппель А. Диэлектрики и волны. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. – 354 с.

Поступила 12.11.2001

**ОВЧАРЕНКО Александр Иванович**, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры НТУ «ХПИ». В 1973 году закончил Украинский заочный политехнический институт. Область научных интересов – информационно - управляющие системы.

**ШАПИРО Михаил Васильевич**, аспирант НТУ «ХПИ». В 1984 году закончил ХПИ. Область научных интересов – информационно - измерительные системы.