

- Винницкая областная государственная администрация
- Сколевская районная государственная администрация
- Союз промышленников и предпринимателей г. Винницы
- Винницкий государственный технический университет
- Черкасский инженерно-технологический институт
- Калужский филиал МТУ им. Н.Э.Баумана
- Центр интеллектуальных услуг «Трансфер»
- Винницкий колледж менеджмента
- ВП Международной Кадровой Академии
- Винницкий авиационный завод
- Винницкий сельскохозяйственный институт

Сборник трудов международного симпозиума

# *Наука и предпринимательство*

Приложение к  
Всеукраинскому научно-  
техническому журналу  
«Вибрации в технике и  
технологии»

Винница - Львов  
1998

**УДК 001.1  
УДК 658.114.1**

**Всеукраинский научно-технический журнал «Вибрации в технике и  
технологиях»**

**Свидетельство о государственной регистрации №611, серия КВ от  
04.05.1994 г.**

**Данное периодическое издание включено в перечень научных изданий,  
утвержденных ВАК Украины**

**ІНН 9-7761-9123-7**

# ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ АМПЛИТУДНО - ФАЗОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ СЫПУЧИХ ВЕЩЕСТВ

А. В. Рудик, А. Н. Возняк

Современный этап экономического развития характеризуется повышенным вниманием к вопросам качества продукции. Отсюда вытекает необходимость оснащения народного хозяйства новыми, более совершенными приборами. Особое значение эта задача приобретает в вопросах контроля и измерения технологических параметров в сельском хозяйстве и пищевой промышленности.

При реализации влагомеров чаще других используется дизелькометрический метод измерения, так как в достаточно узком диапазоне измерения влажности существенно уменьшается погрешность измерения (за счёт исключения влияния плотности упаковки материала в датчике), однако при этом измерения необходимо проводить в диапазоне частот. Наиболее распространенные среди дизелькометрических методов высокочастотные резонансные методы измерения обладают существенным недостатком - значительным увеличением погрешности измерения с ростом диэлектрических потерь в исследуемом веществе. Для исключения отмеченного недостатка предлагается использовать высокочастотный амплитудно-фазовый метод. Рассмотрим теоретические основы высокочастотного амплитудно-фазового метода.

Обобщённая эквивалентная схема измерительного преобразователя, содержащая образцовый элемент  $Z_o$  и ёмкостной чувствительный элемент, включающий эквивалентную проводимость потерь  $G=1/R$  и эквивалентную ёмкость  $C$ , приведена на рис. 1

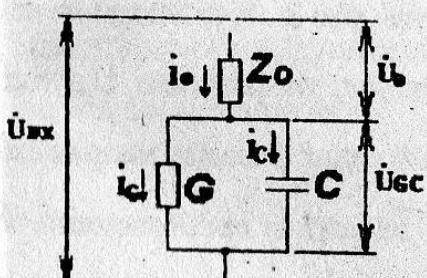


Рис. 1.

В качестве образцового элемента могут быть использованы резистор с сопротивлением  $R_o$ , конденсатор ёмкостью  $C_o$  и катушка с индуктивностью  $L_o$ . Рассмотрим вариант использования в качестве образцового элемента конденсатора.

Входное напряжение  $U_{in}$  вызывает в образцовом элементе ток, определяемый следующим соотношением:

$$I_o = \frac{U_{in} \cdot \sqrt{R^2 + X_C^2} \cdot \exp\left\{j[\arctg(X_{Co} X_C / R(X_{Co} + X_C)) - \arctg(X_C / R)]\right\}}{\sqrt{R^2(X_{Co} + X_C)^2 + X_{Co}^2 X_C^2}} \quad (1)$$

Используя выражение (1), можно определить напряжение на образцовом элементе  $\dot{U}_o$ , напряжение на чувствительном элементе  $\dot{U}_{GC}$ , ток, протекающий в емкостной цепи чувствительного элемента  $I_C$ , а также фазовый сдвиг  $\phi$  между напряжениями  $\dot{U}_o$  и  $\dot{U}_{GC}$ :

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}_{ex} X_{Co} \cdot \sqrt{R^2 + X_C^2} \cdot \exp\left\{j[\arctg(X_{Co} X_C / R(X_{Co} + X_C)) - \arctg(X_C / R)]\right\}}{\sqrt{R^2(X_{Co} + X_C)^2 + X_{Co}^2 X_C^2}}, \quad (2)$$

$$\dot{U}_{GC} = \frac{\dot{U}_{ex} X_C R \cdot \exp\left\{j[\arctg(X_{Co} X_C / R(X_{Co} + X_C))]\right\}}{\sqrt{R^2(X_{Co} + X_C)^2 + X_{Co}^2 X_C^2}}, \quad (3)$$

$$I_C = \frac{\dot{U}_{ex} R \cdot \exp\left\{j[\arctg(X_{Co} X_C / R(X_{Co} + X_C)) + \pi/2]\right\}}{\sqrt{R^2(X_{Co} + X_C)^2 + X_{Co}^2 X_C^2}}, \quad (4)$$

$$\phi = -\arctg(X_C / R). \quad (5)$$

Из выражения (4) следует, что ток  $I_C$  зависит от эквивалентной проводимости потерь  $G$ , так как от этого сопротивления зависит напряжение  $\dot{U}_{GC}$ . При этом от сопротивления потерь зависит как модуль, так и фаза емкостного тока чувствительного элемента. Чтобы избежать этой зависимости, необходимо стабилизировать  $|\dot{U}_{GC}|$  известным способом, регулируя  $|\dot{U}_{ex}|$ , и измерять  $|I_C|$ .

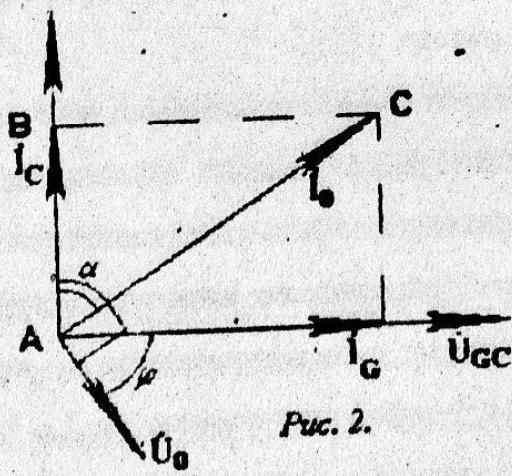


Рис. 2.

Более наглядно способ измерения влажности по ёмкостному току чувствительного элемента можно представить с использованием векторной диаграммы, приведенной на рис. 2. Как видно из векторной диаграммы, напряжение  $\dot{U}_o$ , токи  $I_o$  и  $I_G$ , фазовый сдвиг  $\phi$  между напряжениями  $\dot{U}_o$  и  $\dot{U}_{GC}$  зависят от проводимости потерь:

Не зависит от проводимости потерь только ёмкостной ток  $|I_C|$  при условии постоянства напряжения  $|\dot{U}_{GC}|$ . Из треугольника ABC (рис. 2) находим:

$$|I_C| = |I_o| \cos \alpha = (U_o / X_{Co}) \cos \alpha = U_o \omega C_o \cos \phi, \quad (6)$$

так как из векторной диаграммы (рис. 2) видно, что  $\alpha = \phi$ .

Так как  $|\dot{U}_{GC}| = \text{const}$ , ток  $I_G$  не зависит от проводимости потерь, а только от емкостного сопротивления  $X_C$  чувствительного элемента, поэтому может служить мерой содержания влаги в исследуемом материале.

Таким образом, информативными параметрами измерительного преобразователя при амплитудно-фазовом методе измерения влажности являются фазовый сдвиг  $\phi$  и напряжение  $|\dot{U}_o|$ . Недостатком амплитудно-фазового метода является сложность реализации условия  $|\dot{U}_{GC}| = \text{const}$ .

Если изменение диэлектрических потерь вызывает изменение напряжений  $U_o$  и  $\dot{U}_{GC}$  одновременно, то предположительно их отношение может не зависеть от данного дестабилизирующего фактора. Проверим это предположение. Для упрощения обозначим чувствительный элемент комплексным сопротивлением  $Z$ .

Под воздействием  $\dot{U}_{BX}$  в последовательной цепи возникает ток, вызывающий на емкости  $C_o$  напряжение  $\dot{U}_o$ , на комплексном сопротивлении  $Z$  - напряжение  $\dot{U}_Z$ , которые соответственно равны:  $\dot{U}_o = \dot{U}_{BX} X_{Co} / (X_{Co} + Z)$ ,  $\dot{U}_Z = \dot{U}_{BX} Z / (X_{Co} + Z)$ .

Найдем отношение этих напряжений:

$$\frac{\dot{U}_Z}{\dot{U}_o} = \frac{\dot{U}_{BX} Z}{X_{Co} + Z} \cdot \frac{X_{Co} + Z}{\dot{U}_{BX} X_{Co}} = \frac{Z}{X_{Co}} = \frac{|Z| \exp\{j \cdot \arctg[\operatorname{Im}(Z) / \operatorname{Re}(Z)]\}}{X_{Co}} \quad (7)$$

Так как комплексное сопротивление чувствительного элемента равно

$$Z = \frac{-jX_C R}{R - jX_C} = \frac{RX_C \exp(-j\pi/2)}{\sqrt{R^2 + X_C^2} \cdot \exp\{-j \cdot \arctg(X_C / R)\}}, \quad (8)$$

то отношение модулей напряжений на образцовом и чувствительном элементах будет иметь следующий вид:

$$A = \frac{|\dot{U}_{GC}|}{|\dot{U}_o|} = \frac{|Z|}{X_{Co}} = \frac{RX_C}{X_{Co} \sqrt{R^2 + X_C^2}} = \frac{X_C}{X_{Co} \sqrt{1 + X_C^2 / R^2}} \quad (9)$$

Из соотношения (8) находим фазовый сдвиг  $\phi = \arctg(X_C / R) - \pi/2 = -\arctg(R/X_C)$ , откуда  $\operatorname{tg} \phi = -R/X_C$ . С учетом приведенных выражений соотношение (9) можно переписать следующим образом:

$$A = \frac{X_C}{X_{Co} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \phi}} = \frac{X_C}{X_{Co} \cos \phi} = \frac{X_C \sin \phi}{X_{Co}} \quad (10)$$

Из соотношения (10) нетрудно получить расчётное соотношение для ёмкостной составляющей комплексного сопротивления исследуемого материала:

$$X_C = \frac{AX_{Co}}{\sin \varphi}. \quad (11)$$

Таким образом, измерив отношение напряжений на чувствительном элементе и образцовой ёмкости, а также фазовый сдвиг между ними, можно, используя выражение (11), определить реактивную составляющую комплексного сопротивления исследуемого материала, которая зависит от влажности:

$$W = k \sqrt{R^2 + X_C^2} = k \sqrt{(-AX_{Co}/\cos\varphi)^2 + (AX_{Co}/\sin\varphi)^2} = 2kAX_{Co}/\sin 2\varphi, \quad (12)$$

где  $W$  - влажность исследуемого материала;  $k$  - коэффициент пропорциональности.

Структурная схема влагомера, в котором используется амплитудно-фазовый метод измерения, представлена на рис. 3.

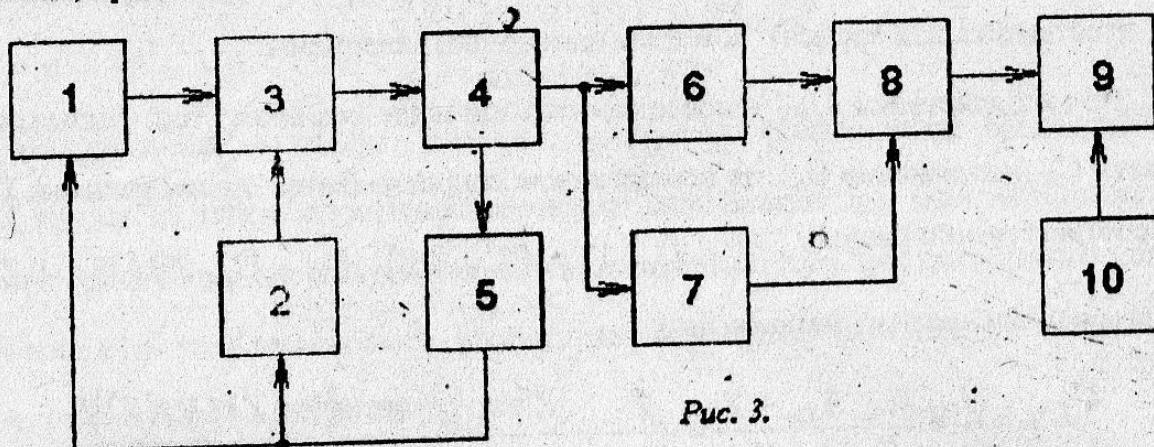


Рис. 3.

Влагомер состоит из генераторов 1 и 2, коммутатора 3, измерительного преобразователя 4, системы автоматической регулировки усиления 5, вольтметра 6, фазометра 7, аналогово-цифрового преобразователя 8, микро-ЭВМ 9 и устройства управления 10.

Предлагаемый амплитудно-фазовый метод может быть использован не только для измерения влагосодержания, но и для анализа диэлектрических параметров различных веществ.