

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ НА ОСНОВЕ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ RC - МОДЕЛЕЙ

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

В статье проанализированы вычислительные аспекты высокочастотных методов измерения влажности с использованием феноменологических RC - моделей материалов. Приведена методика настройки и работы конкретных влагомеров на основе матричных вычислений.

Физико - химическая природа влагосодержания в различных веществах настолько сложна и многообразна, что попытки установить аналитическую связь между влажностью и параметром (параметрами) измерительного преобразователя к настоящему времени считаются неконструктивными. Сказанное относится к веществам в любом агрегатном состоянии (твердое, жидкое, газообразное). Поэтому в практике высокочастотных измерений влажности [1 - 3] главным образом используют RC - модели, которые в контексте работы [4] можно назвать феноменологическими. Их представляют в последова-

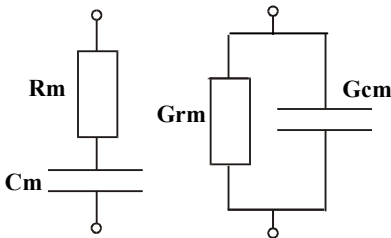


Рис. 1. Представление
RC - моделей

тельному или параллельном виде (рис.1, где R_m , C_m - сопротивление и емкость модели, а G_{rm} , G_{cm} - активная и реактивная проводимости модели). При этом параллельный вид используется гораздо чаще со времени опубликования [5].

Формально для класса RC - моделей можно выделить три подкласса:

- R - подкласс, характеризующийся для последовательной модели значением емкости, равным бесконечности $C_m = \infty$ и для параллельной модели нулевым значением реактивной проводимости $G_{cm} = 0$;
- C - подкласс, характеризующийся для последовательной модели нулевым значением сопротивления $R_m = 0$ и для параллельной модели – значением проводимости, равным бесконечности $G_{rm} = \infty$;
- RC - подкласс, характеризующийся некоторыми интегральными параметрами. В качестве этих параметров в технике высокочастотной влагометрии наиболее часто применяют комплексное сопротивление, комплексную проводимость, добротность эквивалентного конденсатора или контура, в котором он включен, а также тангенс угла потерь $\text{tg } \delta$

эквивалентного конденсатора.

Модели R - подкласса исторически появились, по-видимому, раньше всех, и на их основе созданы приборы так называемого [2] кондуктометрического типа. В приборах этого типа связь между измеряемым электрическим параметром **R** и влажностью **W** ищется в виде [6]:

$$R = \frac{a_0}{W^{a_1}},$$

где **a₁**, **a₀** – модельные постоянные.

Модели C - подкласса появились, по-видимому, позже моделей R - подкласса и на их основе созданы приборы так называемого [2] диэлькометрического типа. Впрочем, в [1] высказываются сомнения в правильности этого названия. Еще чаще приборы этого типа называют емкостными влагомерами [1, 6] и в них связь между измеряемым электрическим параметром **C** и влажностью **W** ищется в виде

$$C = F(W),$$

где **F(W)** – некоторый функционал влажности.

В частности, в [6] приведены данные об использовании степенной модели для влагомеров волокна

$$C = a_2 W^2 + a_1 W + a_0$$

и логарифмической модели для влагомеров торфа

$$C = a_1 \text{Ln}(W) + a_0.$$

В практике измерений влажности адекватные модели R - подкласса и C - подкласса фактически являются гипотетическими, так как условия **C_m = ∞**, **C_m = 0**, **R_m = 0** и **R_m = ∞** невыполнимы. Поэтому следующим этапом высокочастотной влагометрии стали приборы, измеряющие одну из перечисленных выше интегральных характеристик. Пример построения влагомера, использующего измерения добротности резонансного контура, можно найти в [7].

Предлагается рассмотреть метод оценивания параметров RC - моделей, в котором два параметра (в частности, **R** и **C**), в отличие от ранее рассмотренных методов, оцениваются отдельно.

В связи с этим возникает, как минимум, четыре вопроса:

- что же дает отдельное оценивание параметров модели?
- какой второй параметр измеряемого вещества (материала), кроме влажности, может быть полезен для измерения и оказывает существенное влияние на пару измеряемых параметров?
- какие пары прямо измеряемых параметров можно использовать для рассматриваемых целей?
- какая пара прямо измеряемых параметров является оптимальной по точности, скорости и технологичности измерений?

Раздельное оценивание параметров дает возможность измерить не только основной параметр - влажность W , но и некоторый дополнительный параметр D , которым характеризуется измеряемое вещество. При этом фактически решается задача совместных измерений, в которой по результатам прямых измерений параметров P_1 и P_2 модели решением системы уравнений находятся параметры W и D . Такими уравнениями, в частности, могут быть полиномиальные модели видов:

- полная квадратичная модель

$$\begin{cases} P_1 = a_{11} W + \alpha_{12} D + \alpha_{13} WD + a_{14} W^2 + \alpha_{15} D^2; \\ P_2 = a_{21} W + a_{22} D + a_{23} WD + a_{24} W^2 + a_{25} D^2, \end{cases} \quad (1)$$

- неполная квадратичная модель

$$\begin{cases} P_1 = a_{11} W + \alpha_{12} D + \alpha_{13} WD; \\ P_2 = a_{21} W + a_{22} D + a_{23} WD, \end{cases} \quad (2)$$

- линейная модель

$$\begin{cases} P_1 = a_{11} W + \alpha_{12} D; \\ P_2 = a_{21} W + a_{22} D. \end{cases} \quad (3)$$

В правой части выражений (1) - (3) подразумевается отсутствие постоянной составляющей (по размерности совпадающей с P_i).

Ответ на второй из поставленных вопросов о втором параметре D , который можно было бы измерять, конечно же, зависит от конкретного измеряемого вещества (материала). Наш опыт работы с сельскохозяйственными культурами и продуктами их переработки свидетельствует о следующем. Для масличных культур, помимо влажности, важнейшим является масличность, т.е. процентное весовое содержание масел в весовой единице культуры (подсолнечник, рапс, лен, рыжий, тыква, кедр, арахис и т.д.). Отметим, что приборы, реализующие экспресс-методы измерения названных параметров, в настоящее время отсутствуют. Центральным здесь является вопрос о чувствительности аппаратуры к указанным параметрам и этот вопрос приходится решать исключительно эмпирически, причем, как правило, на основе пассивного эксперимента. На этой стадии оцениваются параметры a_{ij} моделей (1) - (3).

Теперь о возможных вариантах прямо измеряемых параметров. Первой и совершенно очевидной парой этих параметров являются значения R и C модели. Ранее отмеченный факт о невозможности установления аналитической связи между прямо измеряемыми параметрами и параметрами W и D материала по существу приводит к выводу о возможности использованию любой пары прямо измеряемых параметров. Исходя из методов измерения R и C , можно предположить, что такими параметрами являются, например, амплитуда и фаза напряжения разба-

ланса или действительная и мнимая часть этого напряжения в неравно-
 весных мостах переменного тока, резонансная частота и резонансное
 напряжение на контуре при контурных резонансных методах и т.д.
 Наконец, для поиска оптимальных в указанном выше смысле методов
 измерений нужно сравнить их между собой. Предварительно исключим
 из рассмотрения методы, связанные с большим объемом ручных опера-
 ций или сложными системами уравнивания (нетехнологичные ме-
 тоды). К ним отнесем методы с использованием уравновешенных мостов
 переменного тока [8] и контурные резонансные методы, использующие
 настройки в резонанс и переключения замещающих элементов [9]. В
 результате практически единственным пригодным с точки зрения по-
 ставленных требований оказывается метод с использованием одинарно-
 го неравновесного моста переменного тока с резонансным контуром в
 одном из плеч. Схема измерений параметров **W** и **D** на основе одинарно-
 го моста представлена на рис.2, где введены следующие обозначения:
 1 – преобразователь фаза - код; 2 – преобразователь амплитуда - код;
 3 – микроконтроллер; **Z_m** – RC - модель измеряемого вещества.

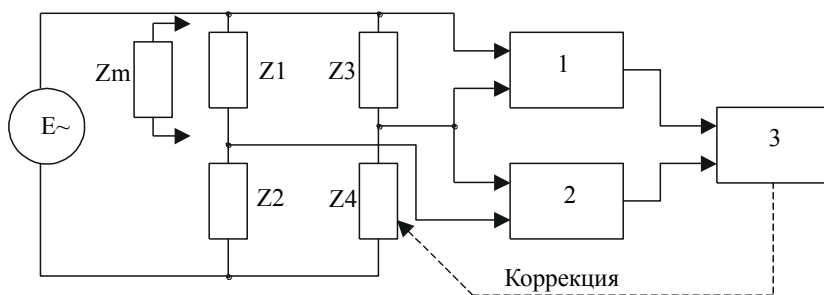


Рис. 2. Схема измерений параметров **W** и **D**

В исходном состоянии (до введения **Z_m**) мост **Z₁ Z₂ Z₃ Z₄** уравнивается (заводская регулировка) в соответствии с условием

$$\mathbf{Z}_1 e^{j\varphi^1} \mathbf{Z}_4 e^{j\varphi^4} = \mathbf{Z}_3 e^{j\varphi^3} \mathbf{Z}_2 e^{j\varphi^2}, \quad (4)$$

где **Z_i** – модуль сопротивления **i**-го плеча; **φ_i** – фазовый сдвиг **i**-го плеча.

Уравнивание моста обеспечивает упомянутое выше равенство нулю свободного члена в моделях (1) - (3).

Как известно, условие (4) распадается на два:

- условие баланса амплитуд

$$\mathbf{Z}_1 * \mathbf{Z}_4 = \mathbf{Z}_3 * \mathbf{Z}_2; \quad (5)$$

- условие баланса фаз

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_3 + \varphi_2. \quad (6)$$

Цепь коррекции, показанная на рис.2 пунктиром, служит для периодической коррекции моста по влияющим факторам (напряжение пита-

ния прибора и моста, температура окружающей среды, частота питания моста – для частотно-зависимых мостов - и т.д.). Коррекция осуществляется по программе, хранимой в ПЗУ микроконтроллера 3. При внесении Z_M мост разбалансируется. Амплитуда и фаза напряжения разбаланса в этом случае представляют собой параметры P_1 и P_2 в моделях (1)...(3). Для высоких входных сопротивлений преобразователей амплитуды в код и фазы в код комплексное напряжение разбаланса определяется следующим образом [8]:

- для соизмеримых значений внутреннего сопротивления Z_c источника и входного сопротивления моста $Z_{вх}$ (со стороны питающих зажимов)

$$U_0 = \frac{-E \left(\frac{\Delta Z_1}{Z_1} \right)}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right) \left[\frac{Z_c}{Z_1} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right) + 1 + \frac{Z_3}{Z_1} \right]}; \quad (7)$$

- для работы источника в режиме генератора напряжения $Z_c \ll Z_{вх}$:

$$U_0 = \frac{-E \left(\frac{\Delta Z_1}{Z_1} \right)}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_3} \right) \left[1 + \frac{Z_3}{Z_1} \right]}; \quad (8)$$

- для работы источника в режиме генератора тока I ($Z_c \gg Z_{вх}$):

$$U_0 = \frac{-I \left(\frac{\Delta Z_1}{Z_1} \right)}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_3} \right) \left[1 + \frac{Z_3}{Z_1} \right] \frac{1}{Z_1}}, \quad (9)$$

где ΔZ_1 – изменение сопротивления первого плеча при внесении материала.

Эти параметры преобразуются в код с помощью преобразователей 1 и 2. Микроконтроллер 3 вычисляет W и P по одному из алгоритмов, следующих из (1) - (3). Рассмотрим особенности вычислений для простейшей линейной модели (3), имея в виду, что $P_1 = A$ (амплитуда напряжения разбаланса), а $P_2 = \phi$ (фаза напряжения разбаланса).

Рассмотрим особенности алгоритмов обработки измерительной информации на примере простейшей линейной модели (3). Запишем уравнение (3) в матричной форме, имея в виду, что $P_1 = A$, $P_2 = \phi$:

$$[A, \phi] = [a] [W, D], \quad (10)$$

Свойства матрицы $[a]$ в уравнении (10) однозначно определяют характер взаимодействия объекта измерений и преобразователя, а также содержание необходимых вычислительных процедур. Предлагается осу-

существить классификацию этих взаимодействий и процедур по свойствам матрицы $[a]$. Анализ ситуации позволил выделить следующие случаи.

1. Матрица $[a]$ является невырожденной, а все ее элементы ненулевые:

$$\det [a] \neq 0; \quad a_{ij} \neq 0 \quad (i = 1,2; j = 1,2).$$

В этом случае двухпараметровые измерения необходимы, оба измеряемых параметра влияют и на A , и на ϕ .

2. Матрица $[a]$ является невырожденной, а один из ее элементов нулевой:

$$\begin{aligned} \det [a] &\neq 0; \\ a_{ij} &= 0 \quad (i > j) \text{ – верхняя треугольная матрица;} \\ a_{ij} &= 0 \quad (i < j) \text{ – нижняя треугольная матрица.} \end{aligned}$$

В этом случае двухпараметровые измерения необходимы для определения параметра, влияющего и на A , и на ϕ , в них нет необходимости для определения другого параметра.

3. Матрица $[a]$ является невырожденной и имеет нулевую диагональ

$$\det [a] \neq 0; \quad a_{ii} = 0.$$

Двухпараметровые измерения возможны, но не необходимы. Результаты измерения W , D оказываются независимыми.

4. Матрица $[a]$ является вырожденной и имеет нулевой столбец:

$$\det [a] = 0; \quad a_{i1} = a_{i2} = 0.$$

Двухпараметровые измерения возможны, но бессмысленны, так как один из измеряемых параметров (W или D) не влияет ни на A , ни на ϕ и не может быть определён, а для определения другого параметра достаточно измерить либо A , либо ϕ .

5. Матрица $[a]$ является вырожденной и имеет нулевую строку:

$$\det [a] = 0; \quad a_{1j} = a_{2j} = 0.$$

Ни однопараметровые, ни двухпараметровые одноразовые измерения невозможны. Оба измеряемых параметра (W и D) не влияют либо на A , либо на ϕ и не могут быть определены из одного уравнения.

Для реализации измерений необходимо иметь возможность варьировать W , D или оба параметра.

6. Матрица $[a]$ является вырожденной и имеет три нулевых элемента:

$$\det [a] = 0; \quad (a_{i1} = a_{i2} = 0) \ \& \ (a_{1j} = a_{2j} = 0).$$

Двухпараметровые измерения невозможны. Один из измеряемых параметров (W или D) не влияет ни на A , ни на ϕ .

Очевидно, что влажность материалов влияет на A и на ϕ . А какой параметр материала также влияет (в зависимости от выбранного порога

чувствительности) на A и на Φ или на один из них является предметом тщательных лабораторных исследований. В зависимости от того, какой параметр (масличность, плотность) выбран в качестве дополнительного параметра D , характер матрицы $[a]$ для различных культур может принимать любой вид (из 6 описанных выше вариантов). Если степень влияния параметра D на A и (или) на Φ высока, то матрица $[a]$ принимает вид 1 или 2 и двухпараметровые измерения просто необходимы для обеспечения удовлетворительной точности.

Необходимо также отметить, что классификация материалов (веществ) по виду матрицы $[a]$ позволила бы очень просто классифицировать всевозможные методы измерений по степени их пригодности для определения интересующих параметров. Изложенное выше позволяет синтезировать алгоритм измерений (рис.3).

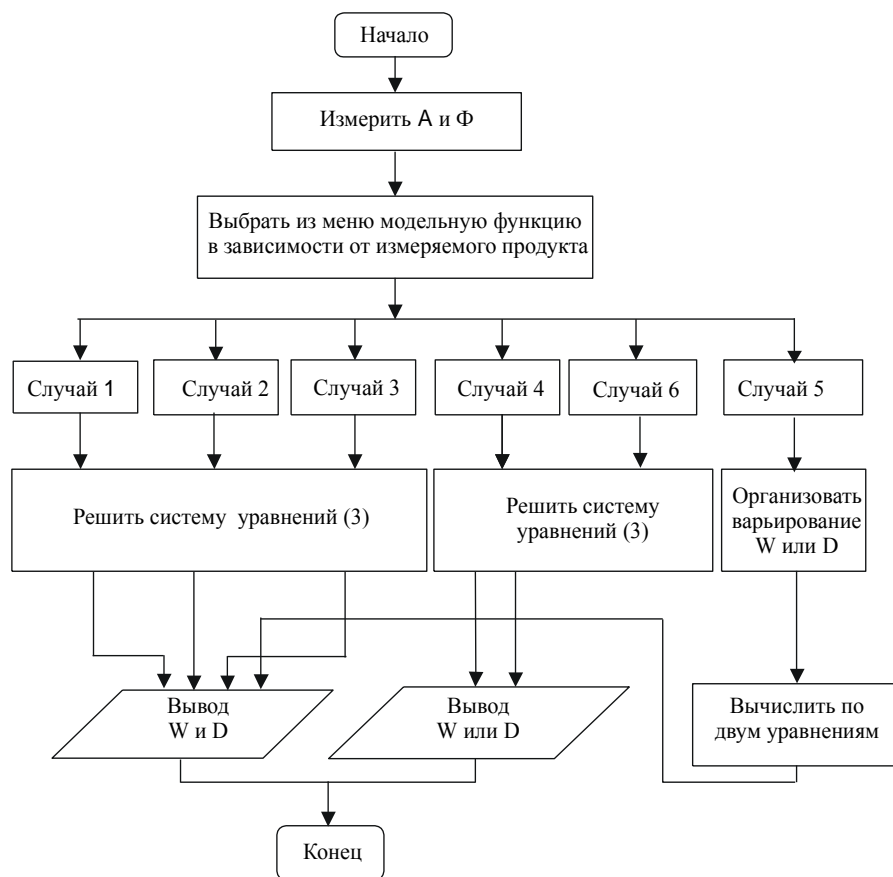


Рис.3. Алгоритм измерений

Результаты, полученные в настоящей работе, дают методологическую и алгоритмическую основу двухпараметрических измерений в классе РС - линейных моделей. Эти результаты положены в основу микропроцессорных влагомеров-масломеров, макеты которых созданы на кафедре «Измерительно-информационная техника» НТУ «ХПИ». Приборы предназначены для сыпучих масляных сельскохозяйственных культур и продуктов их переработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов / Кричевский Е.С., Бензарь В.К., Венедиктов М.В. Под общ. ред. Е.С. Кричевского. – М.: Энергия, 1980. – 176 с.
2. Берлинер М.А. Измерение влажности. – М.: Энергия, 1973.
3. Лапшин А.А. Электрические влагомеры. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960.
4. Хиппель А. Диэлектрики и волны. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1960.
5. Нетушил А.В., Кудинов Б.П., Жуховицкий А.М. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959.
6. Фремке А.В. Электрические измерения неэлектрических величин. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1968.
7. Щапов П.Ф., Овчаренко А.И., Мигущенко Р.П. Оценка метрологических характеристик электромагнитного преобразователя влажности // Український метрологічний журнал. – 1999. – Вип.3. – С.31 - 34.
8. Нестеренко А.Д. Основы расчета электроизмерительных схем уравнивания. – К.: Издательство Академии наук Украинской ССР, 1954.
9. Полулях К.С. Электронные резонансные измерительные приборы. – Харьков: ХГУ, 1961.

Поступила в редколлегию 15.10.2001
