

Для примера на рис. 2 показаны усреднённые СХ для ПСЧЭ № 1, полученные при исследовании бензола и $q_S:q_K = 1:3$. Для соотношения массовых долей $q_S:q_K = 1:1$ имеем $\hat{\mu} = 1,82 \cdot 10^{-2}$, $\hat{\sigma} = 5,11 \cdot 10^{-4}$, $\rho = 2,51 \cdot 10^{-4}$; для $q_S:q_K = 3:1$ имеем $\hat{\mu} = 1,90 \cdot 10^{-2}$, $\hat{\sigma} = 8,31 \cdot 10^{-4}$, $\rho = 4,29 \cdot 10^{-4}$. При увеличении массовой доли силикагеля в ПСЧЭ № 1 появляется выраженная нелинейность СХ в области малых концентраций влажности. В остальном СХ имеют схожий вид и поэтому не приводятся.

Заключение. Предложена и экспериментально подтверждена математическая модель СХ (3) широкодиапазонного ПСЧЭ, предназначенного для измерений влажности ОР. Исследована чувствительность таких элементов для неразрушающего контроля ОР, с помощью двух сорбентов, нанесённых на кварцевую пластину. Разработаны рекомендации по выбору количественного соотношения наносимых сорбентов для различных диапазонов измерения влажности ОР исходя из критерия максимальной чувствительности ПСЧЭ (см. табл. 1).

Л и т е р а т у р а

1. Берлинер М. А. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности. М.: Энергия, 1965.

2. Воронова Т. С., Мазур В. Г., Пудалов А. Д. Применение сорбционно-частотного метода для измерения влажности неполярных органических жидкостей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2012. № 2. С. 114—118.

3. King, W. H. Piezoelectric sorption detector // Anal. Chem. 1964. V. 36. No. 9. P. 1735—1739.

4. Подгорный Ю. В. Частотные детекторы на основе кварцевых резонаторов в аналитических приборах // Измерительная техника. 2004. № 7. С. 36—41.

5. Иващенко В. Е., Мазур В. Г. Пудалов А. Д. Исследование широкодиапазонных пьезокварцевых влажочувствительных элементов // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 4. С. 160—165.

6. Липнин Ю. А., Мазур В. Г., Пудалов А. Д. Исследование динамических свойств широкодиапазонных пьезо-сорбционных датчиков влажности органических жидкостей // Измерительная техника. 2014. № 7. С. 65—68.

7. Серпионова Е. Н. Промышленная адсорбция газов и паров. М.: Высшая школа, 1969.

8. Moravec C. M., Bradford K. J., Laca E. A. Water relations of drumstick tree seed (*Moringa oleifera*): imbibition, desiccation, and sorption isotherms // Seed Sci. & Technol. 2008. No. 36. P. 311—324.

9. Мазур В. Г., Пудалов А. Д., Тур А. А. Приготовление образцов органических жидкостей заданной влажности // Вестник Ангарской государственной технической академии. 2014. № 8. С. 24—28.

Дата принятия: 27.07.2016.

631.3.05

Методика градуировки серийных СВЧ-влажмеров

А. А. КОВАЛЁВА¹, Р. И. САИТОВ¹, А. С. ЗАПОРОЖЕЦ², Е. Г. ПАРФЁНОВА²

¹ Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, Уфа, Россия, e-mail: Purdus@ya.ru

² Уральский научно-исследовательский институт метрологии, Екатеринбург, Россия, e-mail: vlaga@uniim.ru

Представлена методика градуировки СВЧ-влажмеров, позволяющая уменьшить погрешность, определяемую разностью между реальной функцией преобразования и приписанной серии влажмеров номинальной градуировочной зависимостью. С помощью предложенной методики можно распространить результат градуировки одного влажмера с использованием натурального образца материала на все влажмеры серии.

Ключевые слова: сверхвысокочастотный влажмер, градуировка.

The graduation procedure of microwave moisture meters, allowing to reduce the error determined by the difference between the conditionally true function of conversion and attributed to the type of moisture meters nominal calibration dependence. Using the proposed procedure one may to extend the graduation result for all items of a batch.

Key words: microwave moisture meter, graduation.

При установлении номинальной градуировочной зависимости серии влажмеров в суммарную погрешность каждого влажмера добавляется составляющая, обусловленная разностью между реальной функцией преобразования данного влажмера и приписанной серии влажмеров номинальной градуировочной зависимостью. Эта составляющая оп-

ределяется неидентичностью геометрических размеров первичного преобразователя, элементов сверхвысокочастотного (СВЧ) тракта, разницей передаточных характеристик элементов влажмера (детекторов, электронных аттенюаторов, фазовращателей и др.) и температурных зависимостей параметров его электронных и СВЧ-блоков [1]. Данное обстоя-

тельство ужесточает требования к конструкции первичного преобразователя и точности его изготовления, допускаемым значениям разброса перечисленных параметров при разработке элементов СВЧ-тракта и электронных схем, а также к метрологическому обеспечению самого влагомера. Таким образом, возникает необходимость индивидуальной градуировки диэлькометрических и, в частности, СВЧ-влагомеров, что сдерживает их серийное производство.

Разработке новых методов градуировки и поверки СВЧ-влагомеров посвящены работы [1—3]. В [1] предложены теоретико-математические и экспериментальные методы градуировки, в [2] — методика с использованием многомерной математической модели. В [3] рассмотрены встроенные образцовые меры для контроля отклонения номинальной градуировочной характеристики СВЧ-влагомеров.

Цель данной работы — создание новой методики градуировки серии СВЧ-влагомеров, в рамках которой по натуральному образцу материала градуируют только один экземпляр влагомера. При этом результат градуировки будет действителен для всей серии приборов.

Методика градуировки. Измеренный выходной электрический сигнал (сила тока I или напряжение U) при изменении температуры T окружающей среды в заданных пределах и отсутствии материала в измерительном преобразователе пересчитывается в ослабление СВЧ-сигнала $A = f(U, T)$. В этом случае номинальная градуировочная зависимость примет вид $W = F(A)$ или $W = F(f(U, T))$, где W — влажность. Функция $A = f(U, T)$ определяется для каждого влагомера серии с помощью высокоточных аттенуаторов (например, ДЗ-33А) и термометров. Зависимость $W = F(f(U, T))$ одного серийного влагомера можно получить с использованием измерительной эталонной установки I разряда ЭУВТ-1 [4] с относительной погрешностью $\delta_0 = 2,4...0,6\%$ при влажности $5—20\%$ и $\delta_0 = 0,7...0,3\%$ в диапазоне влажности $20—45\%$.

Номинальная градуировочная зависимость серии влагомеров имеет вид полинома 2-й степени

$$W = k_2 f^2(U, T) + k_1 f(U, T) + k_0, \quad (1)$$

где k_0, k_1, k_2 — постоянные коэффициенты регрессии.

При градуировке отдельных влагомеров используют индивидуальные функции $A_i = f_i(U, T)$ и постоянные коэффициенты регрессии из (1): $W = k_2 f_i^2(U, T) + k_1 f_i(U, T) + k_0$, тогда отпадает необходимость индивидуальной градуировки всех влагомеров серии с применением натуральных образцов материалов.

В [5] приведена обобщенная модель СВЧ-влагомера, учитывающая свойства анализируемого материала и параметры первичного преобразователя. В эту модель авторы предлагают в качестве влияющих факторов включить габаритные размеры измерительной камеры a, b, l . Получению выходного электрического сигнала СВЧ-влагомера предшествует ряд преобразований значений влажности анализируемого материала в другие физические величины. Формально функциональную зависимость диэлектрических характеристик материала от его влажности можно рассматривать как первичное преобразование. Далее происходит преобразование действительной ϵ' и мнимой ϵ'' составляющих диэлектрической проницаемости материала в информативные параметры СВЧ-поля — ослабление A и фазу φ СВЧ-сигнала, затем — в напряжение U низкочастотного электрического выходного сигнала влагомера, и в результате получают влажность $W_{изм}$.

На всех этапах преобразований погрешность результатов измерений зависит от влияющих факторов. Погрешность градуировки серии влагомеров обусловлена погрешностью преобразования ослабления A в сигнал напряжения U из-за отличия габаритных размеров a, b, l измерительной камеры, собственных шумов ξ и нестабильности η параметров элементов схемы отдельных влагомеров от средних значений для серии. Отметим, что при прочих равных условиях (т. е. при одинаковых плотности ρ , температуры t , толщины l , степени неоднородности h и массы m материала, а также энергии s связи влаги с материалом) первые два преобразования сводятся к однозначной зависимости A от W .

В [4] предложены способы уменьшения методической и инструментальной погрешностей. Для этого необходимо обеспечить (при одинаковых ρ, t, s, l, h, m) минимальную погрешность номинальной градуировочной зависимости. Случайные составляющие погрешности, обусловленные влиянием ξ, η , уменьшаются за счёт многократных измерений, а систематические, зависящие от температуры T окружающей среды, учитываются в функции преобразования $A = f(U, T)$. Однако вариации параметров a, b, l отдельных влагомеров также вносят систематическую погрешность определения ослабления $A = f(U, T)$. Поэтому требуется найти допуски на указанные геометрические размеры, при которых погрешность измерения ослабления $A = f(U, T)$ без материала в измерительной камере не превысит допускаемое значение.

Найдём ослабление СВЧ-сигнала в пустой измерительной камере без учёта потерь энергии в воздухе по формуле [6]:

$$A = 10 \lg (P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}}), \quad (2)$$

где $P_{\text{вых}}, P_{\text{вх}}$ — мощности СВЧ-сигнала на выходе и входе измерительной камеры;

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} - P_{\text{п}} = \frac{\omega \mu_0}{4\pi} \int_V H^2 dV - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\gamma}} \int_S H_\tau^2 dS; \quad (3)$$

$P_{\text{п}}$ — мощность потерь; $\omega = \sqrt{(m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2} / \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ — резонансная круговая частота волны E_{110} ; μ_0 — магнитная проницаемость воздуха; H, H_τ — мгновенное значение и тангенциальная составляющая вектора напряжённости магнитного поля; V, S — объём и площадь внутренней поверхности измерительной камеры; γ — удельная электрическая проводимость металлических стенок измерительной камеры, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость воздуха.

Подставим значения $P_{\text{вых}}, P_{\text{вх}}$ из (3) в (2) и получим

$$A = 10 \lg \left(1 - 2\pi \int_S H_\tau^2 dS / \sqrt{2\omega \mu_0 \gamma} \int_V H^2 dV \right). \quad (4)$$

Для волны E_{mn0} выражение (4) примет вид

$$A = 10 \lg \left(1 - 8\pi \left[(na)^3 + (mb)^3 \right] / \left[(na)^2 + (mb)^2 \right] a b l \sqrt{2\omega \mu_0 \gamma} \right). \quad (5)$$

Соотношение (5) показывает ослабление энергии, переносимой волной E_{mn0} . Продифференцируем (5) по l для волны E_{110} :

$$\Delta A = 4,34 \cdot 4\pi (a^3 + b^3) \Delta l / \left(\sqrt{2\omega \mu_0 \gamma} (a^2 + b^2) a b l - 8\pi (a^3 + b^3) \right). \quad (6)$$

Разделим (6) на (5) и перейдём к натуральному логарифму. Тогда относительную погрешность измерений влажност-

ти, обусловленную неточностью изготовления измерительной камеры по длине, запишем как

$$\delta_{E_{110}} = \frac{\left\{ \left(abl(a^2 + b^2) \sqrt{2\omega\mu_0\gamma} - 8\pi(a^3 + b^3) \right) l \right\}^{-1} 4\pi(a^3 + b^3) \Delta l}{\ln \left(1 - 8\pi(a^3 + b^3) / \left(abl(a^2 + b^2) \sqrt{2\omega\mu_0\gamma} \right) \right)}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что при $\Delta l \rightarrow 0$ погрешность $\delta_{E_{110}} \rightarrow 0$.

Обозначим $B = abl(a^2 + b^2) \sqrt{2\omega\mu_0\gamma}$; $C = 4\pi(a^3 + b^3)$, тогда (7) примет вид

$$\delta_{E_{110}} = C \Delta l / (\ln[1 - (2C/B)](B - 2C)l). \quad (8)$$

Из (8) выразим допускаемую погрешность длины измерительной камеры

$$\Delta l = [\delta_d] l (B - 2C) \ln[1 - (2C/B/C)], \quad (9)$$

где $[\delta_d]$ — допускаемая погрешность градуировки, соответствующая допускаемой основной абсолютной погрешности влагомера.

В [6] приведены требования к метрологическим характеристикам влагомеров: диапазон измерений влажности 7—30 %; предел допускаемой основной погрешности: $\pm 0,8$; ± 1 % в диапазонах 7—20; 20—30 %, соответственно. Отсюда максимальная относительная погрешность влагомера составляет 11 % при минимальной влажности материала. Допустим, что допускаемая относительная погрешность определения зависимости $A = f(U, T)$ на порядок меньше относительной погрешности влагомера: $\delta_d = 1$ %. Положим: $a = 0,06$ м; $b = 0,06$ м; $l = 0,08$ м. Тогда из (9) следует, что $\Delta l = 0,0016$ м = 1,6 мм. Значения Δa , Δb , рассчитанные при тех же условиях, составляют 0,4 мм.

Лабораторные испытания предложенной методики проведены в Уральском научно-исследовательском институте метрологии. Использовали СВЧ-влагомер с известной индивидуальной градуировочной зависимостью для зерна пшеницы

$$W = 48,45U^2 - 51,39U + 22,32. \quad (10)$$

В нормальных условиях с помощью аттенюатора ДЗ-33А была найдена зависимость ослабления

$$A = 192,23U^2 - 159,57U + 41,12. \quad (11)$$

Затем по известным значениям W , $A = f(U)$ определены коэффициенты номинальной градуировочной зависимости серийного влагомера:

$$W = -0,0035A^2 + 0,5485A + 5,526. \quad (12)$$

С учётом (11), (12) получена индивидуальная градуировочная зависимость

$$W_{\text{изм}} = 49,66U^2 - 51,90U + 22,32. \quad (13)$$

Рассчитанные по (10), (13) значения влажности при доверительной вероятности 0,95 отличаются незначительно.

Таким образом, предложенная методика позволяет существенно сократить время градуировки серии влагомеров, поскольку с применением натурального образца градуируют только один прибор серии.

Л и т е р а т у р а

1. Берлинер М. А. Контроль влажности твёрдых и сыпучих материалов. М.: Энергия, 1973.
2. Ройфе В. С. Методика градуирования диэлькометрических влагомеров с использованием многомерной математической модели // Измерительная техника. 1984. № 11. С. 61—62.
3. Исмагуллаев П. Р., Романов В. Г., Саитов Р. И., Гринвальд А. Б. Встроенные образцовые меры для контроля отклонения номинальной градуировочной характеристики СВЧ-влагомеров // Измерительная техника. 1987. № 10. С. 44—45.
4. Измерительная эталонная установка I разряда ЭУВТ-1 [Электрон. ресурс] <http://www.all-pribors.ru/opisanie/47685-11-euvt-1-50406> (дата обращения 01.06. 2016 г.).
5. Саитов Р. И. СВЧ-влагометрия сельскохозяйственных продуктов. Уфа: Гилем, 2009.
6. Федоров Н. Н. Основы электродинамики: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1980.
7. ГОСТ 29027—91. Влагомеры твёрдых и сыпучих веществ. Общие технические требования и методы испытаний.

Дата принятия: 22.06.2016.