

УДК 543.275.1:631.03

В. В. ЛИСОВСКИЙ

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЭКСПРЕССНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Белорусский государственный аграрный технический университет

(Поступила в редакцию 27.02.2006)

Введение. Возрастающие требования к качеству и конкурентоспособности отечественной сельскохозяйственной продукции выдвигают новые требования к приборам и устройствам экспрессного контроля влажности в большинстве технологических процессов. В современных технологических процессах АПК требуются универсальные приборы, контролирующие влажность широкого круга сельскохозяйственных материалов без дополнительной перестройки, с большой точностью измерения, возможностью контроля дополнительных параметров, например, температуры, натурального веса и др. На первый взгляд кажется, что эта задача легко осуществима, ведь появились недорогие и мощные микропроцессоры. Но на практике не все так просто. Так, наиболее популярные в недалеком прошлом емкостные влагомеры практически достигли пределов своих возможных метрологических характеристик. В то же время максимальный экономический эффект от автоматизации ряда технологических процессов достигается только при очень высокой точности контроля влажности. Так, например, в мукомольной промышленности ошибка в определении влажности зерна на доувлажнении перед помолом на 0,5% способна перевести всю партию муки из высшего сорта в первый, при снижении производительности оборудования и уменьшении выхода готовой продукции до 7%. Традиционные емкостные, а тем более кондуктометрические методы измерения влажности в потоке при этих условиях не могут обеспечить абсолютную погрешность измерения менее 1%.

Попытки совершенствования этих методов на базе многопараметрического контроля при существенном усложнении и удорожании устройств контроля зачастую приводят к тупиковому варианту. Математические аспекты многопараметрического контроля на основе емкостного метода измерений приведены в [1]. В этом случае предполагается решение системы до десятка и более уравнений (в зависимости от числа возмущающих воздействий), что для современной микропроцессорной техники совсем не сложно. Однако главной проблемой здесь является сложность и сама возможность составления системы уравнений. Даже в относительно простом случае измерения влажности при двух возмущающих параметрах (часто их называют мешающими факторами) и перекрытия всего диапазона контроля десятью значениями, для градуировки влагомера необходимо произвести $10^2 = 10^3$ измерений, а с учетом других, как например, для зерновых: сорта, вида, типа, района произрастания, сроков уборки, климатических условий и др., этот процесс становится практически невыполнимым.

Применение в экспресс-влагометрии современных методов, например, «нечеткой логики» [2] или «искусственной нейронной сети» [3], требует глубокого знания электрофизических свойств данной системы либо сложного процесса обучения. Не отрицая перспективности этих направлений, следует отметить возможность дальнейшего совершенствования некоторых традиционных методов и, в первую очередь, сверхвысокочастотных (СВЧ). Выбор этого диапазона для целей точного контроля влажности диктуется как диэлектрическими свойствами самой воды, определяющими высокую чувствительность метода к содержанию влаги при минимальном влиянии так называемых «неинформативных» мешающих факторов, так и рядом других преимуществ: бес-

контактности, большой информационной емкости, экологической безопасности, возможности работы в условиях запыленности и др.

В настоящее время в нашей стране накоплен большой опыт по разработке, серийному производству и особенностям производственной эксплуатации широкого ряда лабораторных и поточных СВЧ-влажномеров для многих технологических процессов сельскохозяйственного производства [4].

Сверхвысокочастотные методы измерения влажности

Методы свободного пространства. Эта группа методов основана на изменении характеристик электромагнитного поля, взаимодействующего с влажным материалом, который находится в свободном пространстве. Принципиально возможна регистрация потока электромагнитного излучения от влажного материала. В этой группе методов измерительными преобразователями являются различные антенны. Измеряемыми характеристиками (назовем их параметрами преобразования) могут быть: амплитуда прошедшей через влажный материал электромагнитной волны E , изменение фазы этой волны φ , коэффициент отражения электромагнитной волны от границы раздела сред «воздух – материал» Γ , плотность потока электромагнитного излучения влажного материала P . Взаимосвязь параметров преобразования с влажностью материала (за исключением последнего) выводится из линейной модели, впервые предложенной в работе [5].

В соответствии с этой моделью для коэффициентов затухания α и фазы β можно записать

$$\alpha_{в.м} = \sum_{n=0}^i \alpha_i V_i, \quad (1)$$

$$\beta_{в.м} = \sum_{n=0}^i \beta_i V_i, \quad (2)$$

где $\alpha_{в.м}$, $\beta_{в.м}$ – постоянная затухания и фазовая постоянная влажного материала; α_i , β_i – постоянные затухания и фазовые постоянные компонентов влажного материала; V_i – объемы i -х компонентов влажного материала.

Так как $\alpha_{в} > \alpha_{с} > \alpha_0$, где символы $_{в}$ и $_0$ обозначают воду, сухой материал и воздух, запишем

$$\alpha = \alpha_{в} \Phi \frac{W}{1-W} \frac{\rho_{с}}{\rho_{в}}, \quad (3)$$

$$\beta = \Phi \frac{W}{1-W} \frac{\rho_{с}}{\rho_{в}} (\beta_{в} - \beta_0) + \Phi (\beta_{с} - \beta_0) + \beta_0, \quad (4)$$

где W – влажность материала; Φ – коэффициент заполнения; $\rho_{с}$, $\rho_{в}$ – плотность (натурный вес) сухого материала и воды.

Наиболее распространены методы затухания (амплитудные), основанные на измерении модуля коэффициента прохождения как функции влажности материала. Функция преобразования материала может быть представлена в виде матрицы рассеяния $\|S\|$ симметричного пассивного четырехполюсника [5]:

$$\|S\| = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Если четырехполюсник симметричный, то в общем виде все элементы матрицы рассеяния являются комплексными величинами, так что $S_{11} = S_{22}$ и $S_{21} = S_{12}$.

$$S^*_{km} = |S_{km}| \exp i \varphi_{km}, \quad (6)$$

где $|S_{km}|$ и φ_{km} – модуль и фаза элемента S_{km} матрицы.

В большинстве случаев измеряется модуль коэффициента прохождения, выраженный в децибелах:

$$N_1 = -20 \lg |S_{21}|. \quad (7)$$

В этом случае другие элементы матрицы рассеяния S_{km} не измеряются. Тогда ослабление электромагнитной энергии во влагосодержащем материале толщиной d будет определяться

$$N = 8,686 \alpha_v \Phi \frac{W}{1-W} \frac{\rho_c}{\rho_v} d. \quad (8)$$

С учетом того, что модуль коэффициента отражения равен [6]

$$\Gamma^2 = \frac{(\alpha_0 - \alpha_1)^2 + (\beta_0 - \beta_1)^2}{(\alpha_0 + \alpha_1)^2 + (\beta_0 + \beta_1)^2}, \quad (9)$$

запишем окончательное выражение для функции преобразования амплитудного метода

$$N = 8,686 \left[\alpha_v \frac{W}{1-W} \Phi \frac{\rho_c}{\rho_v} d + \ln |\Gamma^2| \right]. \quad (10)$$

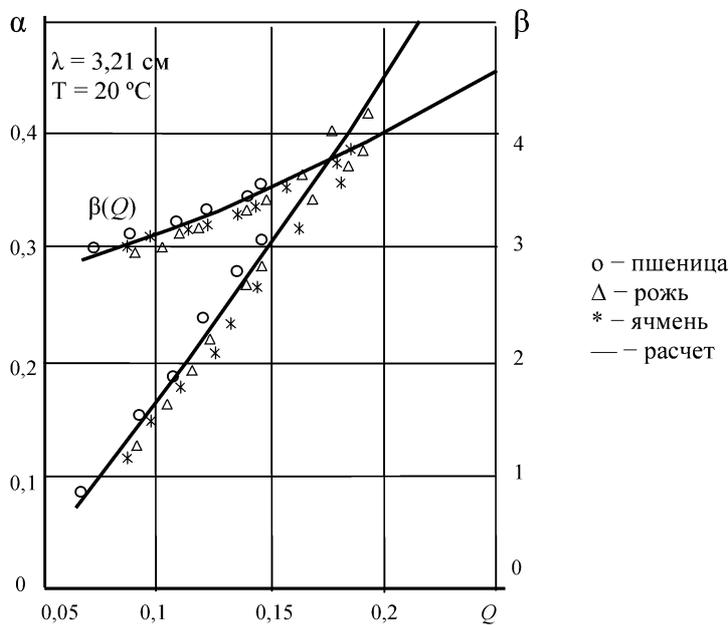


Рис. 1. Зависимость коэффициентов затухания α и фазы β от объемной влажности Q

В случае крупнодисперсных материалов α_v соответствует значению для свободной воды. Для средне- и мелкодисперсных материалов его значение определяется экспериментальным либо расчетным путем как, например, в СВЧ-влажнометрии зерна (рис. 1). Расчетная характеристика, как видим, вполне удовлетворительно согласуется с экспериментом [4].

На основе этого алгоритма (10) работают серийные СВЧ-влажнометры «Микрорадар-113», предназначенные для автоматического контроля и управления процессом сушки зерна в диапазоне влажностей 10–25% с абсолютной погрешностью $\pm 0,25\%$.

Фазовые методы основаны на измерении фазового сдвига электромагнитной волны при прохождении ее через контролируемый материал. Алгоритм преобразования имеет вид [5]

$$\Phi_1 = \Phi_{21}^{(1)} - \Phi_{21}^{(0)}, \quad (11)$$

где $\Phi_{21}^{(1)}$ – фаза S_{21} во влажном материале, $\Phi_{21}^{(0)}$ – фаза S_{21} в отсутствие материала.

Параметр преобразования в фазовых методах находится как разность фаз $\Delta\Phi$ между излучателем и приемником в отсутствие образца и с образцом

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi d_1 \Phi}{\lambda} \left[\frac{\rho_c W}{\rho_v (1-W)} (\sqrt{\epsilon'_v - 1}) + (\sqrt{\epsilon'_c - 1}) \right]. \quad (12)$$

Следует отметить, что реализация (12) возможна при выполнении условия $\Delta\Phi \leq \pi$, что накладывает ограничения на использование этого параметра преобразования.

Параметром преобразования в отражательных методах является модуль коэффициента отражения $|\Gamma|$ от поверхности влажного материала, который определяется выражением

$$|\Gamma| = (\sqrt{\varepsilon' - 1})(\sqrt{\varepsilon' + 1})^{-1}. \quad (13)$$

При этом, как правило, не учитывается изменение фазы коэффициента отражения ϕ_{11} ввиду ее малости [5]. В сельскохозяйственном производстве метод нашел применение во влагометрии почв, а также в тех технологических процессах, когда доступ к контролируемому объекту возможен только с одной стороны [4].

Методы локализованного поля. В этой группе методов объект контроля помещается в отрезок регулярной линии передач (коаксиальной, волноводной, полосковой, двухпроводной и др.). При измерении влажности сыпучих или волокнистых материалов этот участок отделен от линии с двух сторон двумя радиопрозрачными вставкам, толщина которых должна быть кратной половине длины волны в диэлектрике, из которого сделаны вставки, в целях минимизации величины коэффициента отражения. Так же, как и в случае методов свободного пространства, получены выражения для измеряемых параметров прошедшей и отраженной электромагнитной вол-

ны, отличающиеся наличием коэффициента $p = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2$, где $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны в волноводе.

Резонаторные преобразователи обычно основаны на измерении добротности Q или ухода частоты Δf резонатора, частично заполненного влажным материалом (метод малых возмущений).

В [4] на основе линейной модели получены выражения, связывающие некоторые резонаторные параметры преобразования с влажностью материала.

Так, для параметра преобразования ΔN :

$$\Delta N = 8,686 \ln \left[1 + \frac{2Q_{н0}}{B} \Phi \left(\frac{\rho_c \varepsilon_B''}{\rho_B \sqrt{\varepsilon_B'}} W + \frac{\varepsilon_c''}{\sqrt{\varepsilon_c'}} \right) \right] \left[\Phi(\sqrt{\varepsilon_c'} + 1) \right], \quad (14)$$

где $Q_{н0}$ – нагруженная добротность невозмущенного резонатора; B – конструктивный параметр, зависящий от размеров резонатора (рис. 2).

Параметр преобразования Δf в рамках линейной модели имеет вид

$$\Delta f = \frac{f_0}{B} \left\{ \left[\Phi \frac{\rho_c}{\rho_B} \frac{W}{1-W} (\sqrt{\varepsilon_B'} - 1) + \Phi(\sqrt{\varepsilon_c'} - 1) + 1 \right]^2 - 1 \right\}. \quad (15)$$

Рассмотренные методы основаны на измерении только одного параметра, связанного с $\varepsilon'(W, \Phi)$ либо $\varepsilon''(W, \Phi)$. Исключить влияние коэффициента заполнения Φ можно, не выделяя в явном виде влажность материала W , введением так называемого A -параметра [4]:

$$A(W) = k \frac{\varepsilon''}{\varepsilon' - 1}, \quad (16)$$

где $k = \frac{1 + \sqrt{\varepsilon'}}{\sqrt{\varepsilon'}} = 1 \div 2$ (при изменении ε' от 1 до ∞).

Измеряя переходное ослабление ΔN резонатора и уход его резонансной частоты Δf , что не вызывает принципиальных трудностей в технической реализации, получаем алгоритм определения влажности, свободный от влияния коэффициента заполнения Φ :

$$A(W) = k_1 \frac{\exp \frac{\Delta N}{8,686} - 1}{\Delta f}, \quad (17)$$

где $k_1 = k_0 \frac{f_0}{2Q_{н0}}$.

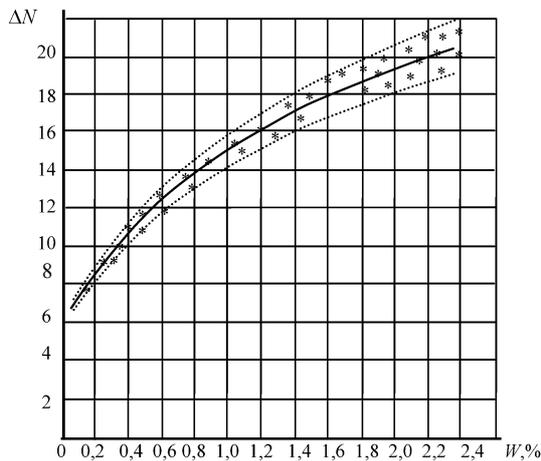


Рис. 2. Зависимость переходного ослабления ΔN объемного резонатора типа E_{010} от влагосодержания кварцевого песка на частоте 1,4 ГГц (расчетная кривая показана сплошной линией)

Производство сухого молока в настоящее время основано на высушивании исходного сырья в распылительных сушилках, причем влажность в этих процессах является фактором, определяющим качество готового продукта.

Так же, как и в свеклосахарном производстве технологический процесс получения сухого молока предполагает контроль влажности в нескольких точках: на выходе продукта из конвекционного сушильного агрегата; после вибросита перед подачей готового продукта на расфасовку.

Применение «Микрорадар-114» для автоматизации технологического процесса сушки молока позволяет управлять работой конвекционных сушилок и поддерживать влажность в необходимых пределах. Пересушка продукта ведет к распаду белков и ухудшению качества сухого молока при значительном перерасходе тепловой энергии, недосушка также влияет как на качество, так и на снижение срока хранения.

Внешний вид одного из вариантов датчика и технологическая схема процесса с вариантами установки прибора приведены на рис. 3.

Прибор обеспечивает: 9 разных градуировок; усреднение результата; связь с компьютером в стандарте RS 485; возможность диагностики; стандартный токовый выход. Диапазон измерения влажности сухого молока 2–7%. Основная абсолютная погрешность измерения в этом диапазоне $\Delta W \leq 0,3\%$.

На основе этого алгоритма построены принципиальные схемы СВЧ-влажномеров табака, чая, продуктов свеклосахарного производства, сухого молока и казеина серии «Микрорадар-114» производства НПП «Микрорадар-сервис», г. Минск [7].

Установка резонаторного СВЧ-влажномера «Микрорадар-114» для непрерывного контроля влажности в свеклосахарном производстве возможна в различных точках технологической линии, что позволит автоматизировать процесс уваривания утфеля на этапе кристаллизации в вакуум-аппаратах. Установка влажномера после центрифугирования позволяет управлять работой и подавать на сушку сахар известной влажности. Применение влажномера на выходе сушильной установки дает возможность автоматизации этого технологического процесса.

Абсолютная погрешность измерения готового сахара не более $\pm 0,03\%$ (в диапазоне изменения влажности 0 ÷ 3%).

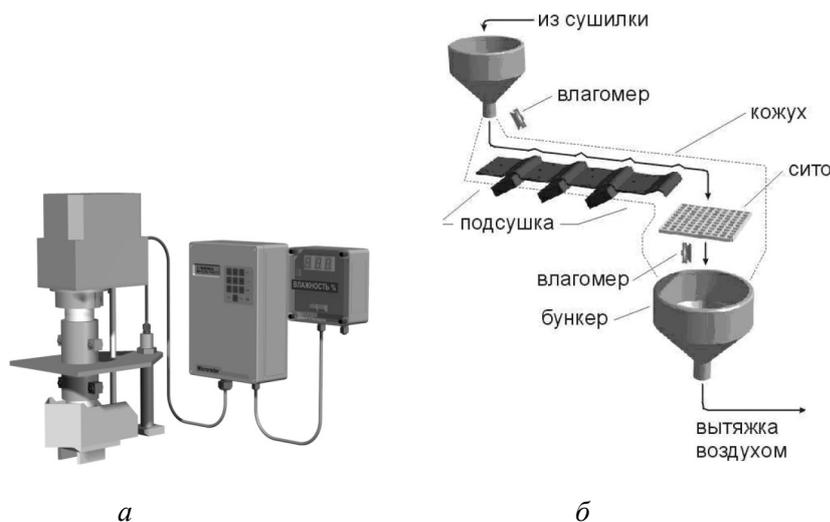


Рис. 3. СВЧ-влажномер «Микрорадар-114»: а – внешний вид; б – вариант установки его в технологической линии производство сухого молока

Заключение. Анализируя рассмотренные методы, отметим следующее: хотя самым простым является метод поглощения, ему присущи и недостатки – велико влияние температуры и плотности на параметр преобразования. В низкочастотной части СВЧ-диапазона существенное влияние оказывают растворенные соли.

Самым неблагоприятным случаем для метода поглощения является контроль влажности таких материалов, у которых знак температурной ошибки зависит от влагосодержания. Если для дискретных влагомеров это затруднение удастся обойти, то для поточных приходится сужать динамический диапазон по влажности, что не всегда удобно.

По сравнению с методом поглощения влияние температуры материала в фазовых методах на параметр преобразования значительно меньше. Для всех видов материала он имеет положительный температурный коэффициент с малой крутизной, вследствие чего значительно упрощаются схемы температурной коррекции. Метод отражения применяется в тех случаях, когда по технологическим требованиям необходим односторонний контакт с контролируемым материалом. Однако чувствительность его значительно ниже, чем для первых двух методов и снижается при больших влажностях.

Применение резонаторных методов дает хорошие результаты, однако ограничено областью малых влагосодержаний.

Следующую группу образуют методы СВЧ-влагометрии, основанные на измерении комплексных параметров преобразования. В большинстве случаев измеряется модуль и фаза одного из коэффициентов рассеяния либо двух резонаторных параметров.

Применение двухпараметровых методов в СВЧ-влагометрии сыпучих сельскохозяйственных материалов позволяет существенно повысить точность измерения влажности за счет учета влияния плотности (коэффициента заполнения), указанные методы, однако, эффективны при сравнительно небольших колебаниях плотности (в пределах 2,5–3 раз) и относительно узком диапазоне изменения влагосодержания. Дальнейшее повышение точности измерения влажности возможно за счет комбинации СВЧ-методов с другими физическими, например СВЧ-акустическим [4].

Описанные выше методы СВЧ-влагометрии могут реализовываться в двух возможных влагометрических системах – активной и пассивной. В активных системах заполненный измерительный преобразователь объединен воедино с генератором СВЧ таким образом, что частота и уровень мощности СВЧ-генератора зависят от параметров заполненного измерительного преобразователя и таким образом могут быть связаны с влажностью материала [5].

Литература

1. J a c h o w i c z R. S. Moisture Content Measurements in Solids-Limitations and Improvements with Modern Technology. Third workshop on «Elektromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances». Athens, USA, 1999. P. 32–41.
2. B a r t l y P. G., N e l s o n S. O., M c C l e n d o n R. W., T r a b e l s i S. Determination of Moisture Content in Wheat Using an Artificial Neural Network. Third workshop on «Elektromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances». Athens, USA, 1999. P. 74–78.
3. A l i p p i C., F e r r e r o A., P i n r i V. Artificial Intelligence for Instruments and Measurement Applications. IEEE Instr. & Meas. Magazine. Vol. 47, N. 1. 1998.
4. Б е н з а р ь В. К. Техника СВЧ-влагометрии. Мн., 1974.
5. Л и с о в с к и й В. В. Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. Мн., 2005.
6. Г у б к и н Л. Н. Физика диэлектриков. Теория электрической поляризации в постоянном и переменном электрическом поле. М., 1971.
7. R e n h a r t I. The Control of Moisture of Rocks by Methods of Microwave Aquametry. 4th International Conference on «Elektromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances». Weimar, 2001. P. 372–379.

V. V. LISOVSKI

UP-TO-DATE METHODS OF EXPRESS MEASUREMENT OF THE MOISTURE CONTENT OF AGRICULTURAL MATERIALS

Summary

The article discusses the most frequently used express – methods of measuring the moisture content of agricultural materials. Emphasis is laid on the influence of a number of factors which hamper the measuring precision as well as on the long-term efficiency of these methods from the point of obtaining maximum precision in moisture content measurements. The article also analyzes a possibility of implementing these methods to control and manage various technological processes in agroindustrial complexes.