

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАДВИСОКОЧАСТОТНОГО ВИМІРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ ЗЕРНА

¹Вінницький національний технічний університет

Швидке та точне визначення вмісту води в будь-якому матеріалі як у процесі виробництва, так і в період експлуатації є найважливішим завданням. Розглянуто методи вимірювання вологості зерна. Зростаючі вимоги до якості та конкурентоспроможності вітчизняної сільськогосподарської продукції висувають нові вимоги до приладів та пристроїв експресного контролю вологості у більшості технологічних процесів. У сучасних технологічних процесах потрібні універсальні прилади, що контролюють вологість сипких продуктів, зокрема зернових. В роботі досліджено методи й засоби контролю вологості зерна, оскільки сучасні технологічні прийоми виробництва сільськогосподарських продуктів значною мірою пов'язані з визначенням вмісту вологи. Надлишок або відсутність у матеріалі вологи впливає на його фізико-хімічні, фізико-механічні та експлуатаційні властивості, а також на якісні показники. Показано, що точність вимірювання вологості суттєво залежить від щільності матеріалів та показників середовища. Авторами проведено детальний аналіз і вибрані параметри, що суттєво впливають на вимірювання вологості зерна. В роботі визначено оптимальний метод для максимально точного вимірювання вологості низки сільськогосподарських матеріалів. Запропоновано математичну модель надвисокочастотного вимірювального перетворення вологості зернових культур, суть якого полягає у вимірюванні потужності сигналів на виході хвилеводу шляхом використання біжучої хвилі та оцінювання коефіцієнтів поглинання як вологості середовища, так і сухої речовини, що дає змогу підвищити точність вимірювання. Авторами розроблено структурну схему надвисокочастотного вимірювача вологості зернових культур, який реалізує запропоновану математичну модель.

Ключові слова: зерно, вимірювання, вологість, методи вимірювання, коефіцієнт поглинання, біжуча хвиля, хвилевод, надвисокі частоти (НВЧ).

Вступ

Вологість зерна є одним з основних факторів, що впливають на тривалість його зберігання без псування та втрат. Величина вологості зерна враховується під час його здавання та приймання для зберігання, оскільки від неї залежить його чиста вага, що впливає на остаточну вартість цього виду продуктів.

У прийманні та технологічній переробці продуктів агропромислового комплексу беруть участь такі технологічні процеси як сушіння, кондиціонування, зволоження, пастеризація та зберігання. Серед параметрів контролю й управління технологічними процесами найважливішим параметром є вологість. Неналежний контроль вологості зернових культур призводить до небажаних наслідків, оскільки наявність надмірної вологи є каталізатором, що активує фізіологічні та фізико-хімічні процеси, такі як проростання, дихання, набухання, активізація ферментів, розщеплення біополімерів [5], [6]. Тому контроль вологості продуктів агропромислового комплексу є важливою задачею, розв'язання якої необхідне для забезпеченні їхньої якості.

Зерно за своєю структурою є капілярно-пористим тілом [1]. Цій структурі властива хімічно зв'язана волога $W = 5...15\%$, яка значно відрізняється за своїми властивостями від вільної води. Її не можна видалити сушінням або віджиманням. Діелектрична проникність вільної вологи складає $\epsilon = 80...81$, тоді як діелектрична проникність зв'язаної вологи $\epsilon = 2...5$, яка мало відрізняється від діелектричної проникності сухого залишку.

Методи вимірювання вологості поділяють на прямі та непрямі. У прямих методах проводиться безпосередній поділ матеріалу на суху речовину та вологу. У непрямих методах вимірюється величина, яка функціонально пов'язана з вологістю матеріалу. Непрямі методи вимагають поперед-

ного калібрування з метою встановлення залежності між вологістю матеріалу та вимірюваною величиною [2].

Усі методи визначення вологості зерна можна розділити на три групи [3]—[5]:

- вимірювання зміни маси;
- вимірювання зміни електричних параметрів;
- поглинання різних видів енергії.

На вітчизняному ринку відсутні вимірювачі, які б відповідали необхідним вимогам за ціною, точністю та надійністю і забезпечували б можливість контролю вологості зерна у режимі реально-го часу. Насамперед, головною задачею є підвищення точності вимірювання.

Найперспективнішим з непрямих методів є дієлькометричний метод у НВЧ діапазоні. Вибір цього діапазону для цілей точного контролю вологості диктується як діелектричними властивостями самої води, що визначають високу чутливість методу до вмісту вологи за мінімального впливу так званих «неінформативних» факторів, що заважають, так і низкою інших переваг: безконтактністю, великою інформаційною ємністю, швидкістю, безпекою, можливістю роботи в умовах запиленості, а також простотою та дешевизною апаратури.

На точність дієлькометричних вологомірів впливає багато чинників, оскільки діелектрична проникність ε об'єкта контролю є складною функцією багатьох параметрів [5], [6].

$$\varepsilon = f(W, T, G, m, \rho),$$

де W , T , G , m , ρ — відповідно вологість, температура, гранулометричний склад проби, хімічний склад проби, маса та густина проби зерна [4]. Оскільки відносна діелектрична проникність води дорівнює 81, а для більшості сухих речовин (зокрема й зерна) вона лежить у межах від 2 до 10, то навіть незначна зміна вологості продукту викликає зміну діелектричної проникності.

На рис. 1 показана узагальнена модель вимірювального перетворення вологості зернових культур.

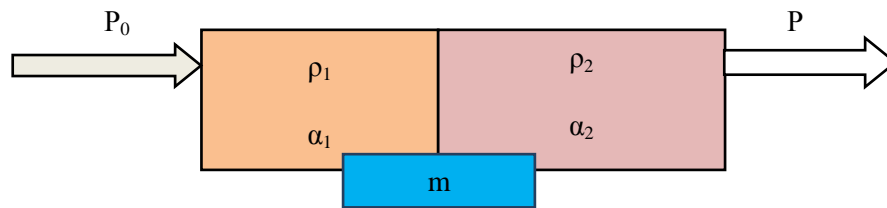


Рис. 1. Узагальнена модель вимірювального перетворення вологості зернових культур

Результати дослідження

Авторами на основі узагальненої моделі запропоновано математичну модель НВЧ вимірювального перетворення вологості зерна, суть якої полягає у вимірюванні коефіцієнтів поглинання вологого матеріалу та сухого залишку зерна НВЧ сигналами біжучих хвиль на певних частотах [8].

Потужність випромінювання P загасає в результаті проходження біжучої хвилі по хвилеводу за законом

$$P = P_0 \cdot e^{-\alpha l}, \quad (1)$$

де P_0 — вхідна потужність, що поширюється по хвилеводу; l — довжина проходження НВЧ сигналу в досліджуваному середовищі; α — загальний коефіцієнт поглинання, що дорівнює

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2, \quad (2)$$

де α_1 — коефіцієнт поглинання для водяної пари; α_2 — коефіцієнт поглинання для сухої речовини.

Коефіцієнт поглинання для водяної пари відповідно визначається [7] так:

$$\alpha_1 = \frac{2\pi l}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{\varepsilon_B'^2 + \varepsilon_B''^2} - \varepsilon_B' \right)}. \quad (3)$$

Коефіцієнт поглинання для сухого залишку

$$\alpha_2 = \frac{2\pi l}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{\varepsilon_C'^2 + \varepsilon_C''^2} - \varepsilon_C' \right)}, \quad (4)$$

де ε'_c — дійсна складова; ε''_c — уявна складова; l — шлях, який проходить електромагнітна хвиля;

λ — довжина хвилі.

Отже
$$m = m_1 + m_2, \quad (5)$$

де m_1 — маса вологи в пробі, m_2 — маса сухого залишку.

Густина вологої проби в загальному випадку визначається як сума густин сухої частини і водяної пари за відповідної температури та відомого об'єму кювети

$$\rho_{\text{абс.в.}} = \frac{m_1}{V}; \quad (6)$$

$$\rho_{\text{абс.з.}} = \frac{m_2}{V}. \quad (7)$$

Густина сухої частини проби, враховуючи (5)—(7), визначається

$$\rho_{\text{абс.з.}} = \frac{m}{V} - \rho_{\text{абс.в.}} \quad (8)$$

Діелектрична проникність пропорційна густині водяної пари

$$\frac{\rho_{\text{в.}}}{\rho_{\text{абс.в.}}} = \frac{\epsilon_{\text{в.}}}{\epsilon_{\text{абс.в.}}}, \quad (9)$$

де $\rho_{\text{в.}}$ — густина води; $\rho_{\text{абс.в.}}$ — абсолютна зв'язана вологість; $\epsilon_{\text{в.}}$, $\epsilon_{\text{абс.в.}}$ — діелектрична проникність води та абсолютна діелектрична проникність зв'язаної вологості.

Відповідно діелектрична проникність пропорційна густині сухого залишку [8]

$$\frac{\rho_{\text{с.}}}{\rho_{\text{абс.з.}}} = \frac{\epsilon_{\text{с.}}}{\epsilon_{\text{абс.з.}}}, \quad (10)$$

де $\rho_{\text{с.}}$ — нормована густина сухої речовини; $\rho_{\text{абс.з.}}$ — абсолютна густина сухого залишку в об'ємі кювети; $\epsilon_{\text{с.}}$, $\epsilon_{\text{абс.з.}}$ — нормована діелектрична проникність сухої речовини та абсолютна діелектрична проникність сухого залишку в об'ємі кювети.

Значення коефіцієнтів поглинання (3), (4) та (8) можуть бути обчислені з урахуванням температурного коефіцієнта [9], де $T_0 = 273 \text{ }^\circ\text{K}$ — температура за нормальних умов

$$k = \frac{T}{T_0}, \quad (11)$$

за формулами

$$\alpha_1 = \frac{2\pi l}{\lambda} \sqrt{\frac{k\rho_{\text{абс.в.}} \left(\sqrt{\epsilon_{\text{в.}}'^2 + \epsilon_{\text{в.}}''^2} - \epsilon_{\text{в.}}'^2 \right)}{2\rho_{\text{в.}}}}; \quad (12)$$

$$\alpha_2 = \frac{2\pi l}{\lambda} \sqrt{\frac{k \left(\frac{m}{V} - \rho_{\text{абс.в.}} \right) \left(\sqrt{\epsilon_{\text{с.}}'^2 + \epsilon_{\text{с.}}''^2} - \epsilon_{\text{с.}}'^2 \right)}{2}}. \quad (13)$$

Визначимо значення зміни потужності вихідної до вхідної потужності від абсолютної вологості з урахуванням (1), (8), (12) і (13) а саме:

$$P = P_0 \cdot e^{\frac{2\pi l}{\lambda} \left(\sqrt{\frac{k\rho_{\text{абс.в.}} \left(\sqrt{\epsilon_{\text{в.}}'^2 + \epsilon_{\text{в.}}''^2} - \epsilon_{\text{в.}}'^2 \right)}{2\rho_{\text{в.}}}} + \frac{k \left(\frac{m}{V} - \rho_{\text{абс.в.}} \right) \left(\sqrt{\epsilon_{\text{с.}}'^2 + \epsilon_{\text{с.}}''^2} - \epsilon_{\text{с.}}'^2 \right)}{2} \right)}. \quad (14)$$

Отриманий вираз (14) дає змогу оціни вихідну потужність НВЧ сигналу на частотах з високим і низьким коефіцієнтом поглинання для зв'язаної вологості досліджуваного продукту та сухого залишку, відповідно, що дає змогу підвищити точність вимірювання в цілому.

На рис. 2 показано схему НВЧ засобу вимірювання вологості сипких продуктів. Основними елементами НВЧ засобу вимірювання вологості є 1 — генератор НВЧ сигналу, 2 — хвилеводний сенсор, 3 — ваги для зважування вологого матеріалу, 4 — температурний сенсор вимірюваного

середовища, 5 — мікропроцесорний пристрій, 6 — цифрове індикаторне табло. При цьому хвилеводний сенсор містить атенюатори, вимірювальну кювета, діодну секцію та узгоджене навантаження. Генератор НВЧ має можливість працювати на декількох частотах [9].

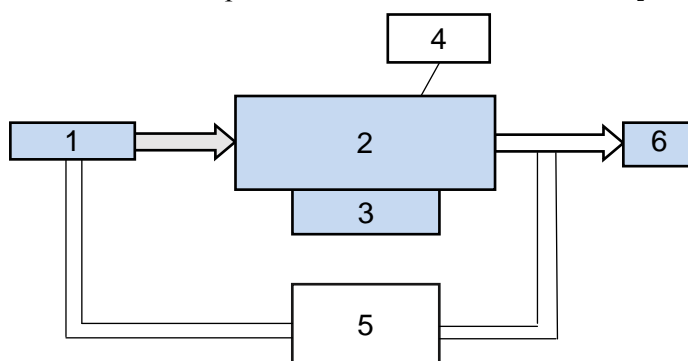


Рис. 2. Схема НВЧ засібу вимірювача вологості зерна

Засіб вимірювання вологості сипких продуктів працює таким чином. Система — хвилевод 2 частково або повністю заповнюється зваженим досліджуванним матеріалом. При цьому реєструється його вага за допомогою ваг 3 та температура — сенсором температури 4. Вимірюється потужність електромагнітного НВЧ сигналу на частотах від генератора частоти 1, що переналаштовується на частоту, чутливу до води, та частоту, не чутливу до води, тобто з високим і низьким коефіцієнтом поглинання. Зі зміною поглинутого випромінювання мікропроцесорний пристрій 5 з урахуванням температури та маси продукту обчислює його вологість. Індикаторне табло 6 показує виміряні температуру та вологість.

Висновки

В роботі запропонована математична модель вимірювання вологості сипких продуктів, яка однозначно пов'язує потужність вихідного сигналу з вологістю сипкого продукту. Така модель дає змогу розробити портативний вимірювач вологості, який не вимагає попереднього висушування досліджуваного продукту та проводити вимірювання в режимі реального часу. Цей метод підходить для польових вимірювань вологості сільськогосподарських продуктів, коли необхідно швидко і точно отримати достовірні результати. Розроблено структурну схему НВЧ вимірювача вологості зерна, яка реалізує запропоновану у статті математичну модель. Результати цієї роботи можуть бути вихідними даними для розробки макета амплітудного НВЧ вологоміра в подальшому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Е. П. Вишневський, і Г. В. Чепурин, *Вплив вологості на властивості матеріалів*. Київ, Україна, 2010.
- [2] ТОВ АкваСенсор. Вологоміри. Харків, Україна. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://agrovektor.com/ua/category/3307-vlagomery.html>. Дата звернення 12.05.2023.
- [3] Держспоживстандарт України 2009 *Жито. Технічні умови : ДСТУ-4522:2006*. від 28.02.2006. Київ, Україна.
- [4] I. Renhart, "The Control of Moisture of Rocks by Methods of Microwave Aquametry," in *Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist, 4th International Conference on «Substances»*, Weimar, 2001, pp. 372-379.
- [5] Ю. В. Крушевський, і Я. О. Бородай, «Вплив масообміну води на точність вимірювання вологості зерна,» *Наукові праці ВНТУ*, № 1, 2007.
- [6] Л. Ф. Скалецька, *Технологія зберігання і переробки продукції рослинництва*. Київ, Україна : Аграрна освіта, 2014.
- [7] Й. Й. Білинський, М. О. Скалецька, «Математична модель надвисокочастотного вимірювача вологості сипучих продуктів,» *LI Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету*, 2023.
- [8] Й. Й. Білинський, Б. П. Книш, і Д. В. Новицький, «Моделювання та експериментальні дослідження НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 7-13, 2021.
- [9] Й. Й. Білинський, Д. В. Новицький, і Б. П. Книш, *Надвисокочастотний метод і засіб вимірювання вологості природного газу*, монографія, ВНТУ, 2022, с. 109.

Рекомендована кафедрою фізики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 24.08. 2023.

Білинський Йосип Йосипович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри фізики, e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com ;

Скалецька Марина Олегівна — аспірантка кафедри фізики, e-mail: maryna.skaletska@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Yo. Yo. Bilynsky¹
M. O. Skaletska¹

Mathematical Model of an Ultra-Highly Sensitive Grain Moisture Meter

¹Vinnitsia National Technical University

The article considers methods for measuring grain moisture. The authors carried out the analysis and selected significant parameters that affect the measurement of grain moisture. Methods and ways of grain moisture control are investigated. Modern technological methods of production of agricultural products are largely related to moisture content. The excess or lack of moisture in the material affects its physico-chemical, physico-mechanical and operational properties, as well as quality indicators. Quick and accurate determination of water content in a particular material, both in the production process and during operation, is the most important task. The accuracy and measurement errors of moisture content of moisture meters significantly depend on the density of materials and the parameters of the measurement medium. The optimal method for the most accurate measurement of humidity has been determined. Growing requirements for the quality and competitiveness of domestic agricultural products put forward new requests for the devices and facilities for express moisture control in most technological processes. Modern technological processes require universal devices that control the moisture content of a wide range of agricultural materials. Having analyzed in detail and determined the significant parameters that affect the measurement of grain moisture, the paper proposes mathematical model of ultra-high-frequency measuring transformation of the moisture of grain crops, the essence of which is to measure the power of this signal at the output of the waveguide when the grain moisture changes by using a traveling wave. By means of the analysis, carried out, the authors suggested the structural diagram of ultra-high-frequency humidity meter of cereal crops which realizes the mathematical model, proposed in the paper.

Keywords: grain, measurement, humidity, humidity control, measurement methods, absorption coefficient, traveling wave, waveguide, ultra high frequencies (UHF).

Bilynsky Yosyp Yo. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Physics, e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com ;

Skaletska Maryna O. — Post-Graduate Student of the Chair of Physics, e-mail: maryna.skaletska@gmail.com