

УДК 621.317.39:578.087

О. М. Куцевол, к. т. н., доц.;

М. О. Куцевол, к. т. н., доц.;

В. Г. Петрук, д. т. н., проф.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ В ЗЕРНІ

Частково розв'язано задачу розрахунку складових діелектричних втрат у вологих капілярно-пористих матеріалах, характерним представником яких є зерно. Це дає можливість зменшити похибки високочастотних діелектрометричних вологомірів.

Вступ

Існуючі нині прилади контролю вологості та вологометричні системи, що базуються на електричних методах вимірювання вологості, відповідають задекларованим похибкам тільки під час роботи з матеріалами, що мають стабільні пористість і діелектричні втрати. Зерно як об'єкт контролю, має нестабільні пористість і хімічний склад [1—3]. Ці його властивості приводять до того, що вимірювання вологості відомими методами дають неоднозначні результати.

Таким чином створення нових методів контролю вологості та приладів контролю вологості на їх основі, які не мали б вказаних недоліків, є завданням, вирішення якого має важливе народногосподарське значення, адже зниження вологості зерна навіть на один відсоток приведе до того, що сотні тисяч тон води буде реалізовано за ціною зерна, а під час зберігання вологого зерна на елеваторах в результаті складних біохімічних процесів якість його погіршиться і виробники нестимуть величезні збитки, тому розробка нових методів та засобів контролю вологості зерна є актуальним науковим завданням. Його вирішення дозволить підвищити вірогідність контролю, знизити енергозатрати та зменшити ризики як виробників, так і споживачів зерна.

Аналіз складових діелектричних втрат вологого зерна

Відомо [4], що втрати в досліджуваному матеріалі складаються із діелектричних втрат і втрат провідності, причому діелектричні втрати визначаються сукупністю всіх видів поляризації, що є в цьому матеріалі. У зв'язку із цим запропоновано еквівалентну електричну схему чутливого елемента (ЧЕ) із досліджуваним матеріалом [5], що показана на рис. 1.

Знайдемо еквівалентні провідності гілок, зумовлені діелектричними втратами

$$\begin{aligned} \underline{Y}_e &= \frac{1}{R_e - jX_e}; & \underline{Y}_a &= \frac{1}{R_a - jX_a}; \\ \underline{Y}_0 &= \frac{1}{R_0 - jX_0}, \end{aligned} \quad (1)$$

де X_e, X_a, X_0 — реактивні опори ємностей C_e, C_a та C_0 , відповідно.

Розкладемо \underline{Y}_e на дійсну та уявну складові:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_e &= \frac{1}{R_e - jX_e} = \sqrt{\frac{1}{R_e^2 + X_e^2}} e^{j \arctg \frac{X_e}{R_e}} = \sqrt{\frac{R_e^2 + X_e^2}{(R_e^2 + X_e^2)^2}} e^{j \arctg \frac{X_e}{R_e}} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{R_e}{R_e^2 + X_e^2}\right)^2 + \left(\frac{X_e}{R_e^2 + X_e^2}\right)^2} e^{j \arctg \frac{X_e}{R_e}} = \frac{R_e}{R_e^2 + X_e^2} + j \frac{X_e}{R_e^2 + X_e^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

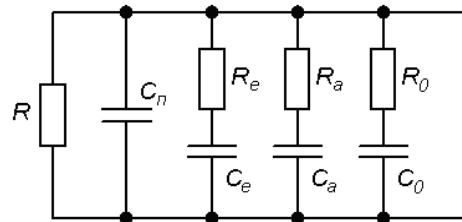


Рис. 1. Еквівалентна електрична схема з досліджуваним матеріалом: R — опір втрат, зумовлений струмами прямої провідності; R_e, R_a, R_0 — опір діелектричних втрат, відповідно, електронної, атомної та орієнтаційної поляризації; C_e, C_a, C_0 — ємності, зумовлені відповідно, електронною, атомною та орієнтаційною поляризацією; C_n — ємність порожнього ЧЕ

За аналогією отримаємо:

$$\underline{Y}_a = \frac{R_a}{R_a^2 + X_a^2} + j \frac{X_a}{R_a^2 + X_a^2}; \quad \underline{Y}_0 = \frac{R_0}{R_0^2 + X_0^2} + j \frac{X_0}{R_0^2 + X_0^2}. \quad (3)$$

Еквівалентна провідність діелектричних втрат

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{\text{екв}} &= \underline{Y}_e + \underline{Y}_a + \underline{Y}_0 = \frac{R_e}{R_e^2 + X_e^2} + j \frac{X_e}{R_e^2 + X_e^2} + \frac{R_a}{R_a^2 + X_a^2} + j \frac{X_a}{R_a^2 + X_a^2} + \frac{R_0}{R_0^2 + X_0^2} + j \frac{X_0}{R_0^2 + X_0^2} = \\ &= \left(\frac{R_e}{R_e^2 + X_e^2} + \frac{R_a}{R_a^2 + X_a^2} + \frac{R_0}{R_0^2 + X_0^2} \right) + j \left(\frac{X_e}{R_e^2 + X_e^2} + \frac{X_a}{R_a^2 + X_a^2} + \frac{X_0}{R_0^2 + X_0^2} \right) = \\ &= \sqrt{A^2 + B^2} e^{j \arctg \frac{B}{A}}, \end{aligned} \quad (4)$$

де $A = \frac{R_e}{R_e^2 + X_e^2} + \frac{R_a}{R_a^2 + X_a^2} + \frac{R_0}{R_0^2 + X_0^2}$; $B = \frac{X_e}{R_e^2 + X_e^2} + \frac{X_a}{R_a^2 + X_a^2} + \frac{X_0}{R_0^2 + X_0^2}$.

Еквівалентний опір діелектричних втрат

$$\underline{Z}_{\text{екв}} = \frac{1}{\underline{Y}_{\text{екв}}} = \sqrt{\frac{1}{A^2 + B^2}} e^{-j \arctg \frac{B}{A}} = \frac{A}{A^2 + B^2} - j \frac{B}{A^2 + B^2} = R_{\text{д.в.}} - jX_{\text{д.в.}}, \quad (5)$$

де $R_{\text{д.в.}} = \frac{A}{A^2 + B^2}$ — еквівалентний активний опір діелектричних втрат; $X_{\text{д.в.}} = \frac{B}{A^2 + B^2}$ — еквівалентний реактивний опір діелектричних втрат.

З урахуванням (5) еквівалентна схема ЧЕ із досліджуванним матеріалом спрощується (рис. 2а).

Реактивний опір діелектричних втрат

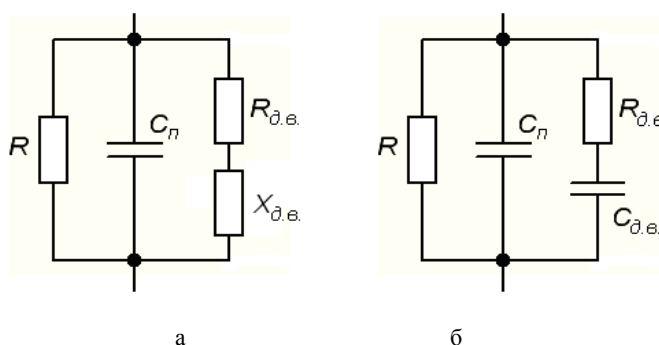


Рис. 2. Узагальнена еквівалентна схема (а) і схема із розподілом діелектричних втрат (б)

$$X_{\text{д.в.}} = \frac{1}{\omega C_{\text{д.в.}}}, \quad (6)$$

де ω — кутова частота струму, що діє в ЧЕ.

Враховуючи (5) і (6), отримаємо

$$C_{\text{д.в.}} = \frac{A^2 + B^2}{\omega B} \quad (7)$$

та еквівалентну схему (рис. 2б).

Еквівалентна схема первинного перетворювача (ПП) показана на рис. 3а, її векторна діаграма — на рис. 3б.

Модуль I знаходиться непрямым методом:

$$I = \frac{U_3}{R_3}. \quad (8)$$

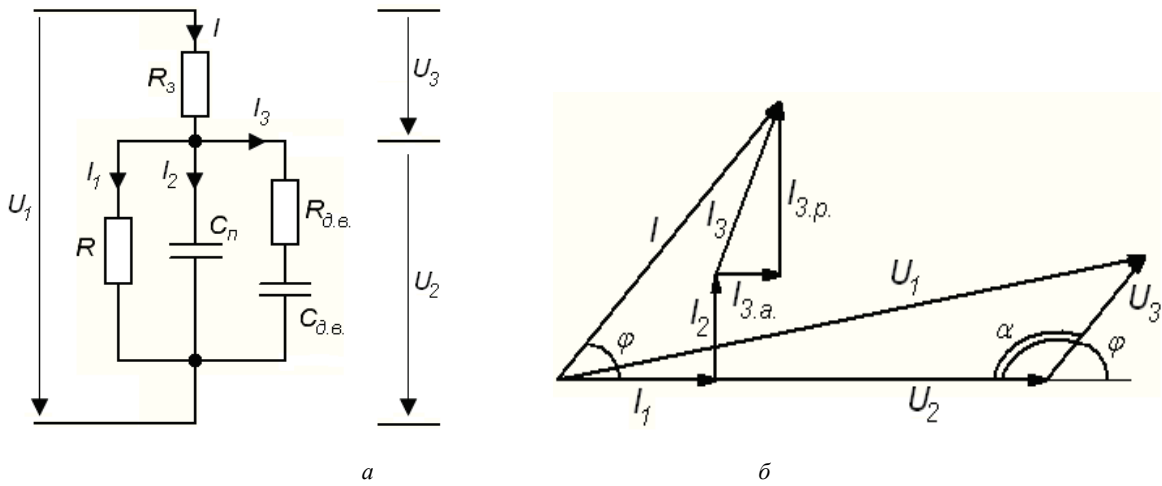


Рис. 3. Еквівалентна схема ПП (а) та її векторна діаграма (б):

R_3 — зразковий опір; I — сумарний струм ПП; I_1 — струм прямої провідності; I_2 — струм незаповненого ЧЕ; I_3 — струм діелектричних втрат; U_1 — вхідна напруга ПП; U_3 — напруга на зразковому елементі; $I_{3.a}$ і $I_{3.p.}$ — активна і реактивна складові струму діелектричних втрат

З урахуванням (8) комплексний сумарний струм ПП

$$\dot{I} = I e^{j\phi}. \tag{9}$$

Опір прямої провідності визначається за постійним струмом

$$R = \frac{U_{2-}}{I_-} = \frac{U_{2-} \cdot R_3}{U_{3-}}, \tag{10}$$

де U_{2-} і U_{3-} — напруги на чутливому і зразковому елементах під час дії на вході ПП напруги постійного струму.

Комплексний струм прямої провідності матиме тільки активну складову

$$\dot{I}_1 = I_1 = \frac{U_2}{R}. \tag{11}$$

Оскільки ємність C_n відома, то

$$\dot{I}_3 = U_2 \omega C_n = I_2 e^{j90^\circ}. \tag{12}$$

За першим законом Кірхгофа

$$\begin{aligned} \dot{I}_3 &= \dot{I} - (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) = I \cos \phi + j I \sin \phi - I_1 - j I_2 = (I \cos \phi - I_1) + j (I \sin \phi - I_2) = \\ &= \sqrt{(I \cos \phi - I_1)^2 + (I \sin \phi - I_2)^2} e^{j \arctg \frac{I \sin \phi - I_2}{I \cos \phi - I_1}} = I_3 e. \end{aligned} \tag{13}$$

Знаходимо комплексний опір діелектричних втрат

$$\underline{Z}_3 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_3} = \frac{U_2}{\sqrt{(I \cos \phi - I_1)^2 + (I \sin \phi - I_2)^2}} e^{-j \frac{I \sin \phi - I_2}{I \cos \phi - I_1}}. \tag{14}$$

З виразу (14) визначаємо:

$$R_{д.в.} = \frac{(I \cos \phi - I_1) U_1}{(I \cos \phi - I_1)^2 + (I \sin \phi - I_2)^2}; \tag{15}$$

$$X_{д.в.} = \frac{(I \sin \phi - I_2) U_2}{(I \cos \phi - I_1)^2 + (I \sin \phi - I_2)^2};$$

$$C_{д.в.} = \frac{(I \cos \phi - I_1)^2 + (I \sin \phi - I_2)^2}{\omega U_2 (I \sin \phi - I_2)}. \quad (16)$$

Висновок

Частково розв'язано задачу розрахунку складових діелектричних втрат у вологих капілярно-пористих матеріалах, характерним представником яких є зерно. Це дає можливість зменшити похибки високочастотних діелектрометричних вологомірів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Казаков Е. Д. Зерноведение с основами растениеводства / Е. Д. Казаков. — 3-е изд., доп. и перераб. — М. : Колос, 1983. — 352 с.
2. Горелова Е. И. Качество зерна — второй урожай / Е. И. Горелова, Ж. Я. Сандлер. — М. : Колос, 1984. — 221 с.
3. Резерви скорочення втрат у рослинництві / [М. Є. Романенко, В. І. Грушко, І. П. Карпець та ін.] ; за ред. М. Є. Романенка. — К. : Урожай, 1990. — 312 с.
4. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов / [Е. С. Кричевский, В. К. Бензарь, М. В. Венедиктов и др.] ; под общ. ред. Е. С. Кричевского. — М. : Энергия, 1980. — 240 с.
5. Нетушил А. В. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников / А. В. Нетушил, Б. П. Кудинов, А. М. Жуковичкий. — М.—Л. : Госэнергоиздат, 1959. — 182 с.

Рекомендована кафедрою екології та екологічної безпеки

Надійшла до редакції 12.05.10
Рекомендована до друку 20.05.10

Куцевол Олег Миколайович — доцент, **Куцевол Микола Олександрович** — доцент.

Кафедра тракторів, автомобілів і технічного сервісу машин Вінницького національного аграрного університету;

Петрук Василь Григорович — завідувач кафедри екології та екологічної безпеки Вінницького національного технічного університету