

*В.С. ЛУПІКОВ*, д-р техн. наук., проф., зав. каф., НТУ "ХПІ", Харків

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ ВОВНИ

Проведено аналіз існуючих методів вимірювання діелектричної проникності вовни, на основі якого визначено, що найкращим методом є резонаторний метод внаслідок його значних переваг.

Проведен анализ существующих методов измерения диэлектрической проницаемости шерсти, на основе которого определено, что наилучшим методом являются резонаторный метод вследствие его значительных преимуществ.

**Вступ.** Останнім часом широке розповсюдження отримують технології висушування матеріалів за допомогою електромагнітних хвиль високої частоти внаслідок їх виняткових властивостей, таких як екологічна безпека, зменшення енергоспоживання, рівномірність висушування та інше. Найбільше застосування такі технології отримали при сушінні деревини, зерна, лікарських трав та продуктів харчування. Безперечно ця технологія може ефективно використовуватись при висушуванні вовни, зберігаючи її природні властивості, на відміну від існуючих. Одним із основних параметрів, який впливає на процес висушування є діелектрична проникність матеріалу, яка визначається експериментальним шляхом.

**Мета роботи** – аналіз існуючих методів визначення діелектричної проникності матеріалів.

**Теоретичні положення.** Кількість енергії, що поглинається речовиною при сушінні електромагнітним полем надвисокої частоти, визначається за законом Джоуля-Ленца [1]:

$$W = 0,278 \cdot 10^{-10} \epsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot f \cdot E^2 \cdot V \cdot t, \quad (1)$$

де  $\epsilon'$  – діелектрична проникність матеріалу;  $\operatorname{tg} \delta$  – діелектричні втрати в матеріалі;  $f$  – частота електромагнітного поля, Гц;  $E$  – напруженість електромагнітного поля, В;  $V$  – об'єм матеріалу, м<sup>3</sup>;  $t$  – час нагрівання.

Як видно з (1), процес сушіння вовни в значній мірі залежить від її діелектричної проникності, тому для розрахунків технологічного обладнання та процесу сушіння вовни важливо знати її значення.

**Характеристики діелектричної проникності.** Діелектрична проникність вовни істотно залежить від її структури, фізико-хімічних

властивостей та вологості [2]. Існує значна кількість методів визначення діелектричної проникності речовини, які відрізняються один від іншого складністю реалізації, точністю вимірювання, можливістю автоматизації і безперервності вимірювання [3, 4].

В діапазоні надвисоких частот (від  $10^8$  до  $10^{11}$  Гц) визначення діелектричної проникності засноване на використанні об'ємних резонаторів і радіохвилеводів, а також на закономірностях поширення електромагнітних хвиль у вільному просторі. У випадку газоподібних діелектриків вимірюють резонансну частоту  $\omega_0$  і добротність  $Q_0$  об'ємного резонатора при створеному в ньому вакуумі, і вимірюють ті ж величини  $\omega_e$  і  $Q_e$ , коли резонатор цілком заповнений діелектриком. При цьому мають місце співвідношення:

$$\epsilon' = \omega_0 / \omega_e ; \quad \text{tg } \delta \approx 1/Q_e - 1/Q_0 . \quad (2)$$

У випадку рідких і твердих діелектриків, якщо вони цілком заповнюють резонатор, виходять більші зміни резонансної частоти  $\omega_0$  і добротності  $Q_0$ . Крім того, якщо діелектричні втрати великі, то добротність резонатора стає дуже малою величиною і це порушує справедливність співвідношень (2). Тому резонатор у формі диска або стрижня заповнення діелектриком частково.

Інший метод визначення діелектричної проникності в діапазоні надвисоких частот полягає в тому, що в радіохвилеводі встановлюється стояча електромагнітна хвиля або така, що біжить. При введенні діелектрика в хвилевід змінюються умови розповсюдження хвиль і відбувається поглинання енергії електромагнітного поля. Це дозволяє визначити  $\text{tg } \delta$ .

**Методи вимірювання діелектричної проникності речовин у надвисокочастотному діапазоні.** Для вимірювання діелектричної проникності речовин у надвисокочастотному діапазоні використовуються наступні методи [5]: хвилеводний; метод вимірювання у вільному просторі; метод вимірювання в об'ємному резонаторі.

*Хвилеводний метод* передбачає вимірювання діелектричної проникності з використанням електромагнітних хвиль, що направляються хвилеводом, і ґрунтується на змінах фази і амплітуди стоячої електромагнітної хвилі або такої що біжить при розміщенні досліджуваної речовини у хвилеводі. Для вимірювання діелектричної проникності твердих речовин використовується метод повного заповнення перерізу хвилеводу. При цьому зразок досліджуваного матеріалу певної товщини розміщується у хвилеводі впритул до його стінок та короткозамкненої пластинки. Електрофізичні характеристики досліджуваного матеріалу пов'язані зі зміною картини стоячих хвиль в хвилеводі без речовини і описуються за допомогою співвідношень, які отримуються

при вирішенні трансцендентного рівняння з визначення комплексної діелектричної проникності [7]. Цей метод має низьку точність вимірювання внаслідок неможливості аналітичного рішення трансцендентного рівняння і неоднозначності функцій, що входять до нього.

*Метод вимірювання у вільному просторі* полягає у спостереженні електромагнітних хвиль, що пройшли або відбилися від речовини, за допомогою фокуруючих і направляючих пристроїв. Найпростішим способом вимірювання діелектричної проникності є спосіб, який заснований на вимірюванні кута Брюстера [1]. Такий спосіб дозволяє робити вимірювання комплексної діаграми направленості у широкому діапазоні ( $\epsilon' = 2-500$ ;  $\text{tg}\delta = 0,001-0,5$ ) на зразках різних геометричних форм з точністю приблизно 2 % по  $\epsilon'$ .

*Методи вимірювання в об'ємному резонаторі*, засновані на визначенні коефіцієнта відбиття та прозорості речовин з малими втратами, мають значні експериментальні труднощі. Для підвищення точності вимірювань необхідно пропускати електромагнітні хвилі через еталонне та досліджуване середовища, які розміщуються послідовно. Змінюючи товщину середовищ, модулюють по фазі електромагнітну хвилю, але при цьому підтримують сумарну товщину середовищ постійною, а діелектричну проникність визначають по зміні величини фазового відхилення.

**Методи вимірювання діелектричної проникності речовин в сантиметровому діапазоні.** При сантиметровому діапазоні довжин хвиль для вимірювання діелектричної проникності речовин широко використовуються об'ємні резонатори [4]. Резонаторні методи побудовані на вирішенні рівнянь електромагнітного поля для конкретного типу робочої хвилі і конструкції резонатора з урахуванням впливу на поле досліджуваного зразка, що розміщується в резонаторі. Розрахунок та вимірювання відносної діелектричної проникності  $\epsilon'$  і тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  виконується шляхом вимірювання резонансної частоти та добротності у разі резонатора без зразка  $f_0$ ,  $Q_0$  і у разі резонатора зі зразком  $f_1$ ,  $Q_1$ .

У довгохвилевій частині сантиметрового діапазону широко використовуються циліндричні та прямокутні резонатори з коливаннями хвиль поля типу  $E_{01n}$  або  $H_{01n}$ . При малих втратах у зразках використовуються коливання типу  $E_{01n}$ , так як у цьому випадку має місце максимум електричного поля у зразку і, таким чином, досягається найбільша чутливість. При великих втратах для зниження чутливості вигідніше використовувати коливання типу  $H_{01n}$ , тому що при цьому має місце нульове електричне поле на осі резонатора.

Для матеріалів з невеликим значенням проникності і втрат засто-

совується метод повного заповнення резонатора. Похибка цього методу близько 0,01 % для діелектричної проникності та 3-5 % для  $\text{tg}\delta$  з чутливістю по  $\epsilon'$  до  $10^{-7}$ - $10^{-8}$ .

Використання резонаторного методу вимірювання діелектричної проникності вовни передбачає застосування резонаторного пристрою в якості частотного дискримінатора, який визначає принцип побудови системи перетворення частоти. В таких системах перетворення частоти здійснюється на основі частотного автопідстроювання. Перевагами таких схем є нескладність схемного та апаратного вирішення, стійкість до низькочастотних збурень, можливість вимірювання декількох змінних.

Об'ємні резонатори, повністю обмежені металевою поверхнею, не завжди можуть задовольняти вимогам вимірювань діелектричної проникності речовин, тому широко використовуються нерегулярні граничні резонатори [4]. Відкрита конструкція і вища добротність дозволяє проводити безперервне вимірювання параметрів рухомих середовищ та автоматизувати процес вимірювання. Дослідження коливань типу  $H_{01n}$  на частоті 10,43 ГГц показали, що добротність граничного резонатора більша в 2 рази, а біконічного резонатора більше в 3 рази ніж добротність закритого резонатора.

**Висновки.** Перевагами резонаторних методів визначення діелектричної проникності вовни є їх висока надійність і чутливість, універсальність вимірювання, створення полів необхідної конфігурації, автоматизація процесів вимірювань, безперервний контроль.

**Список літератури:** 1. Харвей А.Ф. Техника сверхвысоких частот. – М.: Сов. радио, 1965. – 783с. 2. Черенков А.Д., Андрейчук Е.И. Теоретический анализ процесса СВЧ-сушки влажной шерсти. // Питання електрифікації сільського господарства. – Харків, 1998. – С. 97-100. 3. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с. 4. Электровакуумные приборы диапазона миллиметровых волн / Л.В. Касаткин, В.П. Рукин, В.Д. Еремка, В.Д. Науменко, Г.Н. Рапопорт, В.С. Мирошниченко. – Севастополь: Вебер, 2007. – 252 с. 5. Бранут А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – М.: Физматгиз, 1964. – 404 с.

*Надійшла до редколегії 20.01.2011  
Рецензент д.т.н., проф. Болух В.Ф.*