

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-07>

УДК 537.87:621.31

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ РЕЧОВИН ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ЗОНДУВАННЯМ У ХВИЛЕВОДІ

В.В. Овсяніков¹, М. М. Горобець², О.Р. Безносова¹

¹ Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, проспект Гагаріна 72, м. Дніпро, 49010, Україна
E-mail: thalia@i.ua

² Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, пл. Свободи 4, Харків, 61022,
Україна

E-mail: nikolay.n.gorobets@karazin.ua
Надійшла до редакції 15 жовтня 2020 р.

Актуальність. Проблеми дистанційного неруйнуючого визначення й контролю показників якості широкої різноманітності матеріальних середовищ, зокрема, господарських і продовольчих товарів, актуальні практично для всіх областей народного господарства, науки й техніки. Актуальність наукових досліджень в області діелектрометрії в мікрохвильовому діапазоні обумовлена також потребами розвитку високих технологій у медицині й охороні здоров'я, народному господарстві в реальному часі.

Ціль роботи – розвиток методу мікрохвильовий хвильоводної діелектрометрії на основі застосування теорії багатопарових плоскошаруватих діелектричних структур до визначення комплексної діелектричної проникності речовини за значеннями коефіцієнта стоячої хвилі досліджуваних зразків у хвильоводі на дві близьких частотах.

Матеріали й методи. Дослідження засновані на добре вивчених явищах інтерференції електромагнітних хвиль на багатопарових плоскошаруватих діелектричних структурах. За рахунок використання математичної моделі явища інтерференції плоскої електромагнітної хвилі на тришаровій діелектричній структурі переборена неоднозначність визначення комплексної діелектричної проникності речовини класичним методом хвильоводної діелектрометрії в мікрохвильовому діапазоні по вимірюваннях коефіцієнта стоячої хвилі зразка діелектрика, розміщеного у хвильоводі, і фазового кута коефіцієнта відбиття.

Результати. Запропонований метод забезпечення однозначності визначення комплексної діелектричної проникності речовини у хвильоводній діелектрометрії на основі теорії багатопарових плоскошаруватих діелектричних структур. Метод приводить до явного вираження для комплексного коефіцієнта відбиття електромагнітної хвилі від досліджуваного зразка діелектрика, поміщеного в прямокутний хвильовід. Комплексна діелектрична проникність речовини визначається за значеннями коефіцієнта стоячої хвилі на дві близьких частотах у мікрохвильовому діапазоні. За знайденим значенням діелектричної проникності й тангенсу кута діелектричних втрат визначається параметр якості речовини шляхом порівняння й оптимізації двох цільових функцій, що включають отриманий у процесі вимірів і складений зарані масиви еталонних значень комплексної діелектричної проникності, і шляхом порівняння й оптимізації третьої цільової функції, що включає результати оптимізації двох попередніх функцій. Як приклад показника якості речовини визначена питома теплота згорання вугіль.

Висновки. Запропонований метод визначення комплексної діелектричної проникності й показників якості діелектричних матеріалів у мікрохвильовому діапазоні частот апробований у випадку різних типів вугіль, доведена його працездатність і забезпечення вірогідності результатів. Метод і реалізовані на його основі прилади й математичне забезпечення перспективні для неруйнуючого експрес - контролю діелектричних матеріалів і середовищ.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: мікрохвилі, комплексна діелектрична проникність, хвильоводна діелектрометрія, оптимізація цільової функції, показник якості речовини, питома теплота згорання.

QUALITY CONTROL OF SUBSTANCES BY ELECTROMAGNETIC SENSING IN A WAVEGUIDE

V.V. Ovsyanikov¹, N.N. Gorobets², E.R. Beznosova¹

¹ O. Honchar Dnipro National University, 72 Gagarin Avenue, Dnipro, 49010, Ukraine
Email: thalia@i.ua

² V.N. Karazin Kharkiv National University, 4 Sq. Svobody, Kharkiv, 61022, Ukraine
Email: nikolay.n.gorobets@karazin.ua

Relevance. The problems of remote non-destructive determination and control of quality indicators of a wide variety of material environments, in particular, household and food products, are relevant practically for all areas of the national economy, science and technology. The relevance of scientific research in the field of dielectrometry in the microwave range is also due to the needs for the development of high technologies in medicine and health care, the national economy in real time.

The aim of this work is to develop the method of microwave waveguide dielectrometry based on the application of the theory of multilayer plane-layered dielectric structures to the determination of the complex dielectric constant of a substance from the values of the standing wave ratio of the samples under study in a waveguide at two close frequencies.

Materials and methods. The research is based on well-studied phenomena of interference of electromagnetic waves on multilayer plane-layered dielectric structures. By using a mathematical model of the phenomenon of interference of a plane electromagnetic wave on a three-layer dielectric structure, the ambiguity of determining the complex dielectric constant of a substance by the classical method of waveguide dielectrometry in the microwave range by measuring the standing wave ratio of a dielectric sample placed in the waveguide and the phase angle of the reflection coefficient is overcome.

Results. A method is proposed for ensuring the unambiguity of determining the complex dielectric constant of a substance in waveguide dielectrometry on the basis of the theory of multilayer plane-layered dielectric structures. The method leads to an explicit expression for the complex reflection coefficient of an electromagnetic wave from the investigated dielectric sample placed in a rectangular waveguide. The complex dielectric constant of a substance is determined from the values of the standing wave ratio at two close frequencies in the microwave range. By the found value of the dielectric constant and the tangent of the dielectric loss angle, the quality parameter of the substance is determined by comparing and optimizing two objective functions, including the arrays of reference values of the complex dielectric constant obtained in the course of measurements and compiled in advance, and by comparing and optimizing the third objective function, previous functions. As an example of an indicator of the quality of a substance, the specific heat of combustion of coal was determined.

Conclusions. The proposed method for determining the complex dielectric constant and quality indicators of dielectric materials in the microwave frequency range has been tested in the case of various types of coals, its efficiency has been proven and the reliability of the results has been proven. The method and the devices and software implemented on its basis are promising for non-destructive express control of dielectric materials and media.

KEY WORDS: microwaves, complex dielectric constant, waveguide dielectrometry, objective function optimization, material quality index, specific heat of combustion.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ВЕЩЕСТВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ЗОНДИРОВАНИЕМ В ВОЛНОВОДЕ

В.В. Овсяников¹, Н. Н. Горобец², Е.Р. Безносова¹

¹ Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, проспект Гагарина 72, г. Днепр, 49010, Украина

E-mail: thalia@i.ua

² Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, пл. Свободы 4, Харьков, 61022, Украина

E-mail: nikolay.n.gorobets@karazin.ua

Актуальность. Проблемы дистанционного неразрушающего определения и контроля показателей качества широкого разнообразия материальных сред, в частности, хозяйственных и продовольственных товаров, актуальны практически для всех областей народного хозяйства, науки и техники. Актуальность научных исследований в области диэлектromетрии в микроволновом диапазоне обусловлена также потребностями развития высоких технологий в медицине и здравоохранении, народном хозяйстве в реальном времени.

Цель работы – развитие метода микроволновой волноводной диэлектromетрии на основе применения теории многослойных плоскостойких диэлектрических структур к определению комплексной диэлектрической проницаемости вещества по значениям коэффициента стоячей волны исследуемых образцов в волноводе на двух близких частотах.

Материалы и методы. Исследования основаны на хорошо изученных явлениях интерференции электромагнитных волн на многослойных плоскостойких диэлектрических структурах. За счет использования математической модели явления интерференции плоской электромагнитной волны на трехслойной диэлектрической структуре преодолена неоднозначность определения комплексной диэлектрической проницаемости вещества классическим методом волноводной диэлектromетрии в микроволновом диапазоне по измерениям коэффициента стоячей волны образца диэлектрика, размещенного в волноводе, и фазового угла коэффициента отражения.

Результаты. Предложен метод обеспечения однозначности определения комплексной диэлектрической проницаемости вещества в волноводной диэлектromетрии на основе теории многослойных плоскостойких диэлектрических структур. Метод приводит к явному выражению для комплексного коэффициента отражения электромагнитной волны от исследуемого образца диэлектрика, помещенного в прямоугольный волновод. Комплексная диэлектрическая проницаемость вещества определяется по значениям коэффициента стоячей волны на двух близких частотах в микроволновом диапазоне. По найденному значению диэлектрической проницаемости и тангенсу угла диэлектрических потерь определяется параметр качества вещества путем сравнения и оптимизации двух целевых функций, включающих полученный в процессе измерений и составленный заранее массивы эталонных значений комплексной диэлектрической проницаемости, и путем сравнения и оптимизации третьей целевой функции, включающей результаты оптимизации двух предыдущих функций. В качестве примера показателя качества вещества определена удельная теплота сгорания углей.

Выводы. Предложенный метод определения комплексной диэлектрической проницаемости и показателей качества диэлектрических материалов в микроволновом диапазоне частот апробирован в случае различных типов углей, доказана его работоспособность и обеспечение достоверности результатов. Метод и реализованные на его основе приборы и математическое обеспечение перспективны для неразрушающего экспресс - контроля диэлектрических материалов и сред.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микроволны, комплексная диэлектрическая проницаемость, волноводная диэлектрометрия, оптимизация целевой функции, показатель качества вещества, удельная теплота сгорания.

ВСТУП

В даний час однією з актуальних проблем народного господарства є визначення показників якості широкої різноманітності речовин і товарів, як електротехнічної промисловості, так і різних палив, руд, будівельних матеріалів, господарських і продовольчих товарів, і інших речовин з діелектричними властивостями, що характеризують певною мірою показники якості даних речовин. Дослідженню відносної комплексної діелектричної проникності (КДП) речовин із застосуванням електромагнітного (ЕМ) поля присвячений ряд робіт [1 - 6] та інших актуальних до нашого часу і пізніших публікацій [7 - 15, 17]. Дані про КДП деяких речовин приведені в таблиці 1.

В даній статті наведені результати досліджень і визначення відносної КДП речовин ($\bar{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon''$) і її використання для визначення їх показників якості.

Таблиця 1. Дані з літератури і результати вимірювань КДП твердих і рідких речовин

Речовина	Параметри речовин			f , ГГц	Примітка
	ϵ'	ϵ''	tg δ		
Вода дистильована	79,3	7,9	0,1	1,74	[2, 4, 6] і ін.
	75,8	10,3	0,14		Вимірювання
	76,3	15,6	0,20	3,65	[2, 4, 6] і ін.
	74,3	13,2	0,18		Вимірювання
Ацетон	21,4	–	–	3,0	[2, 4, 6] і ін.
	20,9	–	–		Вимірювання
Олія трансформаторна	2,1 – 2,3	–	$(2 - 5) \times 10^{-3}$	3,0	[2, 4, 6] і ін.
	2,178	–	$5,64 \times 10^{-3}$		Вимірювання
Поліетилен	2,25	–	2×10^{-4}	3,0	[2, 4, 6] і ін.
	2,18	–	$1,5 \times 10^{-4}$		Вимірювання
Фторопласт-4	1,9 – 2,2	–	$(2-3) \times 10^{-4}$	3,0	[2, 4, 6] і ін.
	2,0	–	$2,5 \times 10^{-4}$		Вимірювання
Вугілля марки ТК	4,1 – 5,0	–	–	1,0	[2, 4, 6] і ін.
	4, 5	–	0,035		Вимірювання
Вугілля - антрацит	> 5,0	–	–	1,0	[2, 4, 6] і ін.
	5,5	1,4	0,25		Вимірювання

ПРО НЕДОНЕДОЛКИ ХВИЛЕВОДНОГО МЕТОДУ БРАНДТА-ХАРВЕЯ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ КДП ДІЕЛЕКТРИКІВ

В роботах Брандта [1], Харвея [2] і інших для визначення КДП діелектричного зразка товщиною d хвильовим методом запропоновано наведене нижче комплексне трансцендентне рівняння (1).

$$\frac{th(hd)}{hd} = -i \frac{\lambda_B}{2\pi d} \cdot \frac{1 - iK_C \operatorname{tg}\theta_\phi}{K_C - i \operatorname{tg}\theta_\phi}, \quad (1)$$

Це рівняння включає заздалегідь визначені значення за допомогою вимірювальної лінії (ВЛ) або іншого приладу: коефіцієнту стоячої хвилі за напругою (K_C), довжини хвилі у хвильоводі λ_B , фазового кута коефіцієнту відбиття $\theta_\phi = \frac{2\pi}{\lambda_B} x_m$, який відповідає відстані x_m від поверхні зразка до першого мінімуму стоячої хвилі. Також включає товщину досліджуваного зразка d і поздовжнє хвильове h (або постійну поширення) ЕМ хвилі у хвильоводі зі зразком

$$h(f, \bar{\epsilon}) = \sqrt{k^2 - \chi^2} = \sqrt{(2\pi f / c)^2 \cdot \bar{\epsilon} - \chi^2}, \quad (2)$$

де: χ – поперечне хвильове число для даного типу хвилі у прямокутному хвильоводі π/a , розмір широкої стінки хвильовода a, робоча частота f і швидкість поширення ЕМ потужності у вільному просторі c.

Після отримання та підстановки в (1) зазначених вище параметрів з цього виразу визначається КДП досліджуваного зразка, присутня в вираженні (2). Визначення КДП можливо виконувати за допомогою вимірювальної лінії (ВЛ), наприклад типу Р1-17 та подібних їй, електромеханічна частина яких виконана з високою точністю. При цьому розглянутий вище відомий метод визначення КДП речовин має такі недоліки:

1. Неможливість аналітичного рішення рівняння (1), а при його численному рішенні отримуємо рівномірну безліч різних результуючих значень $\bar{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon''$, обумовлених періодичністю входять до нього функцій, що приводить до неоднозначності і невизначеності результату (Метод Брандта-Харвея, таблиця 2), що є неприйнятним для використання на практиці.

2. Так як одним з важливих вихідних параметрів при визначенні КДП за допомогою формул (1) і (2) є K_C у хвилеводі, при вимірюваннях великих значень ($K_C > 2$) іноді знижується точність отриманого результату. Це приводить до зростання похибки визначення КДП по формулам (1) і (2). До того ж дослідження показали, що K_C для різних видів речовин може приймати значення приблизно від 1,1 до 10 і вище. При цьому для звичайних ВЛ їх розробники гарантують відносну похибку вимірювання K_C в межах 2 – 6 % тільки при $K_C < 2$ і частоті НВЧ генератора 0,5 – 3 ГГц, а при $K_C > 2$ точність вимірювань K_C взагалі не гарантована. Це обумовлено також тим, що при великих значеннях K_C важко досить точно визначити його значення за звичайною формулою $K_C = U_{\max}/U_{\min}$, тому, що значення U_{\max} часто великі і перевищують максимальну межу шкали вимірювального приладу, а значення U_{\min} вельми малі і знаходяться поблизу області шумів. В літературі [1, 2] та іншої запропоновані більш точні методи визначення K_C , що однак ускладнює процес вимірювання і автоматизацію визначення K_C і КДП. Також відзначимо, що на відміну від хвилеводного методу визначення K_C , розглянутого вище, його можна визначити ЕМ зондуванням досліджуваної речовини у вільному просторі, наприклад, роботи [9, 12] та інші, однак такий метод не відповідає тематиці даної статті і буде розвинутий пізніше.

Нижче запропоновано метод усунення зазначених вище недоліків методу Брандта-Харвея при визначенні КДП речовин шляхом застосування теорії багат шарових структур.

ВИЗНАЧЕННЯ КДП РЕЧОВИН ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕОРІЇ БАГАТОШАРОВИХ СТРУКТУР

Для усунення зазначеного вище недоліку методу Брандта-Харвея [1, 2] - тобто неоднозначності визначення КДП із застосуванням виразів (1) і (2) пропонується застосувати дещо інший підхід з використанням теорії багат шарових діелектричних структур [3]. Відповідно до цієї теорії одним з шарів даної структури (рис. 1) може бути досліджувана речовина 2 з товщиною, сумірною з довжиною робочої ЕМ хвилі, падаючої на межі розділу середовищ повітря 1, досліджуваного речовини 2 і повітря 3. На рис.2 показаний загальний вигляд діючого макету хвилеводної вимірювальної комірки (ХВК), що реалізує структуру (рис. 1), під'єднуємого со своїм фланцем до вимірювального НВЧ приладу. З урахуванням позначення через d товщини досліджуваного шару 2 запропоновані вирази для комплексних коефіцієнтів відбиття R від кордонів розділу шарів 1 - 2 і 2 - 3 для ЕМ хвилі типу ТЕ. При цьому середовища 1 - 3 знаходяться у вільному просторі і їх розміри в горизонтальній площині прагнуть до нескінченності.

Вираз для коефіцієнтів відбиття ЕМ хвилі для тришарової системи (рис. 2) має вигляд:

$$R = \frac{R_{12} + R_{23} e^{-2i\beta}}{1 + R_{12} R_{23} e^{-2i\beta}}, \quad (3)$$

де: $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d \cos \theta_2$ и $n_j = \sqrt{\epsilon'_j - i\epsilon''_j}$, $j = 1, 2, 3 \dots$

n_j – коефіцієнт заломлення середовища.

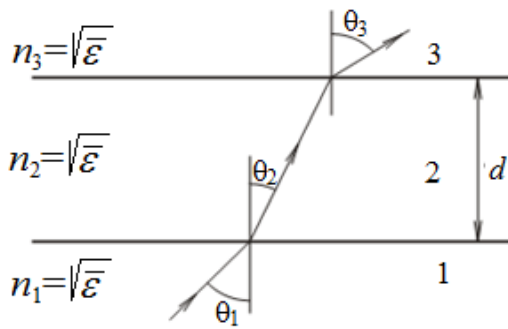


Рис. 1. Тришарова діелектрична структура [3] для дослідження взаємодії шарів між собою: повітря - 1, досліджувана речовина - 2, повітря - 3.

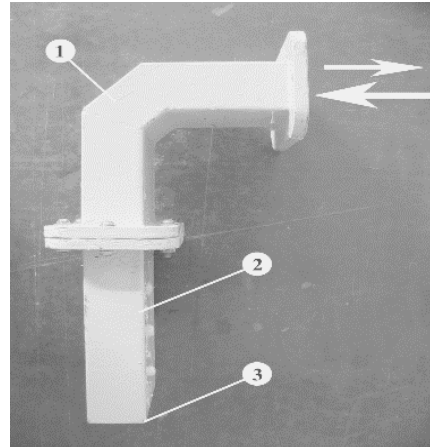


Рис. 2. Діючий зразок ХВК: 1 - невідбивальний вигин прямокутного хвильоводу; 2 - контейнер з досліджуваною речовиною; 3 – короткозамикач

Зокрема, для нормального падіння ЕМ хвилі на цю структуру ($\theta = 0^0$) маємо такі вирази:

$$R_{12} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \quad R_{23} = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3}. \quad (4)$$

Перетворимо записані математичні залежності (3) і (4) для коефіцієнтів відбиття у вільному просторі в реальну розрахункову модель для випадку хвильоводної структури ХВК (рис. 2) і тришарового середовища в замкнутому просторі з відрізка металевого прямокутного хвильоводу, всередині якого розповсюджується плоска ЕМ хвиля типу H_{10} від генератора в напрямку ХВК. При цьому для прямокутного хвильоводу з розміром широкої стінки рівним a , з урахуванням робіт [1, 2] поздовжнє хвильове число (2) еквівалентне коефіцієнту заломлення n в роботах [3, 4]. Тоді вираз (4) для комплексного коефіцієнта відбиття хвилі від першого кордону середовищ має вигляд

$$R_{12} = \frac{h_1(f) - h_2(f, \bar{\epsilon})}{h_1(f) + h_2(f, \bar{\epsilon})} = \frac{\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} - \sqrt{k_0^2 \cdot \bar{\epsilon} - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}}{\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} + \sqrt{k_0^2 \cdot \bar{\epsilon} - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}}, \quad (5)$$

де: h_1 - поздовжнє хвильове число (2) або постійна поширення ЕМ хвилі для середовища 1; h_2 - поздовжнє хвильове число для середовища 2; $\bar{\epsilon}$ - комплексна відносна діелектрична проникність середовища 2; $k_0 = 2\pi/\lambda$ - хвильове число середовища 1; f - робоча частота ЕМ хвилі.

З огляду на те, що днище 3 ХВК з досліджуваним зразком (рис. 3) - металеве, у вираженні (3) коефіцієнт відбиття від короткозамикача 3 дорівнює $R_{23} = -1$ (за умови, що втрати в ньому не враховуються) воно набуває вигляду

$$R_{(f, \bar{\epsilon})} = \frac{R_{12} - e^{-2i\beta}}{1 - R_{12} e^{-2i\beta}}. \quad (6)$$

Тоді з урахуванням (6) для випадку наявності досліджуваного зразка речовини у середині ХВК, отримаємо розрахункову формулу для загального комплексного коефіцієнту відбиття $R(f, \bar{\epsilon}, d)$ у вигляді:

$$R(f, \bar{\epsilon}, d) = \frac{R_{12}(f, \bar{\epsilon}) - \exp\left(-i 2d \sqrt{k_0^2 \cdot \bar{\epsilon} - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}\right)}{1 - R_{12}(f, \bar{\epsilon}) \cdot \exp\left(-i 2d \sqrt{k_0^2 \cdot \bar{\epsilon} - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}\right)}, \quad (7)$$

де R_{12} визначено формулою (5).

Для визначення КДП речовини, що входить до співвідношень (5-7) беремо до уваги відоме співвідношення між модулем коефіцієнта відбиття R і КСХН [1 - 5] у вигляді

$$\left| R_i(\varepsilon', \varepsilon'', f_i, d) \right| = \frac{K_{ci}^{\text{изм}} - 1}{K_{ci}^{\text{изм}} + 1}, \quad (8)$$

де $i = 1, 2, 3 \dots$ - номер частоти заданого діапазону, на якій визначається КСХН. За допомогою виразів (7) та (8) можна визначити КДП речовини [8, 13, 14] тільки за допомогою КСХН, що вельми важливо. При визначенні КДП вимірювання КСХН виконуємо на двох близько розташованих частотах для значень КСХН $i = 1, 2$, при умові, що систематична похибка відліку частот вимірювального приладу зведена до мінімуму і значення КДП між цими частотами величина приблизно постійна. На цьому інтервалі двох відліків $i = 1, 2$ визначаємо дійсну і уявну частини КДП даної речовини. Аналогічним чином визначаємо КСХН і потім КДП для наступної пари відліків $i = 2, 3$ близько розташованих частот. У якості вимірювальної апаратури для визначення КСХН можна застосовувати вимірювальну лінію. Для автоматизації вимірювань доцільно використовувати модульний автоматизований вимірювач КСХН та ослаблення типу P2 або P2M, векторний вимірювач Spectrum Analyzer R & S FSH (Німеччина), і іншу апаратуру. У таблиці 2 наведені результати визначення КДП двома розглянутими вище методами

Таблиця 2. Результати визначення КДП трьох зразків вугілля марки ТК

Номер зразка	Метод Брандта-Харвея Частота вимірювань 3, 57 ГГц. Вимірювальний прилад –ВЛ типу P1-17)				Запропонований метод Частоти вимірювань K_{c1} і K_{c2} : f_1 и $f_2 =$ 4,0 ГГц і 4, 15 ГГц, відповідно. Вимірювальний прилад - типу P2-53			
	K_c	θ_ϕ	ε'	ε''	K_{c1}	K_{c2}	ε'	ε''
1	4,41	4,52	2,78 4,03 5,54	0,19 0,31 0,48	2,20	2,30	4,46	0,25
2	5,12	4, 54	2,79 4,07 5,62	0,17 0,27 0,41	1,95	2, 01	3,80	0,16
3	4,58	4, 22	2,60 3,77 5,19	0,15 0,22 0,29	1,44	1,48	3,38	0,12

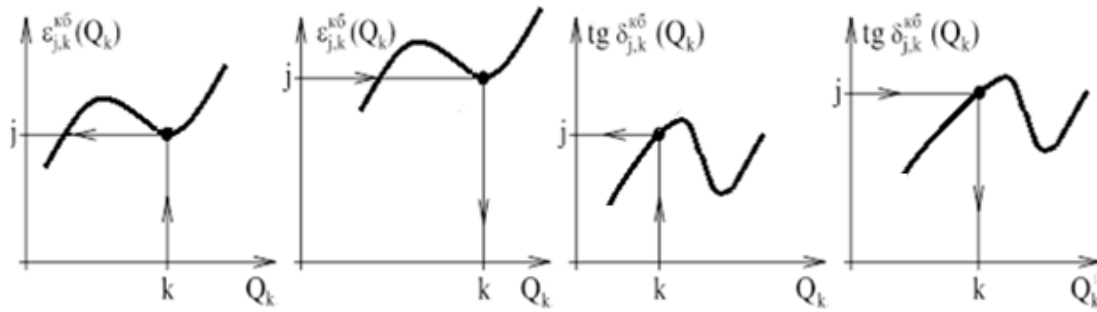
В даній таблиці: θ_ϕ - фазовий кут коефіцієнту відбиття від досліджуваного зразка $\theta_\phi = \frac{2\pi}{\lambda_B} x_m$, де λ_B - довжина хвилі у вимірювальному хвилеводі і ХВК; x_m - відстань від поверхні зразка у ХВК до першого мінімуму стоячої хвилі.

З таблиці 2 випливає, що, якщо при визначенні КДП відомим методом Брандта-Харвея отримуємо невизначену безліч рішень трансцендентного рівняння (1), що неприйнятно, то за допомогою виразів (5) - (8) такої невизначеності результатів КДП можна уникнути

ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ РЕЧОВИНИ ПРИ ВІДОМОМУ ЗНАЧЕННІ ЙОГО КДП

Після відшукування значення КДП досліджуваної речовини для визначення даного нас його параметра якості (ПЯ) застосовуємо відомий метод зіставлення знайденого значення КДП з масивом заздалегідь накопичених каліброваних (еталонних) значень ПЯ даної речовини з відповідними їм КДП, тобто за правилом: «відома КДП ймовірної речовини - відповідне їй значення ПЯ, подібно роботам [9, 12] та інших. На першому етапі визначення ПЯ даної речовини і завчасно виконуємо градування, тобто, вимірюємо за допомогою НВЧ апаратури ЕМ характеристики різних речовин, в даному випадку їх КДП і ПЯ на одній або декількох частотах мікрохвильового діапазону і створюємо масив каліброваних даних з інформацією про всі можливі варіанти речовин, що підлягають дослідженню. Процес створення масивів даних з калібрувальними значеннями дійсної частини КДП $\varepsilon_{j,k}^{\text{КБ}}(Q)$ і тангенса кута діелектричних

втраг $tg\delta_{j,k}^{кб}(Q)$ - показаний на спрощених графіках залежності $\varepsilon_{j,k}^{кб}(Q)$ і $tg\delta_{j,k}^{кб}(Q)$ від ПЯ речовин (Q). (Рис. 3, а і рис.4, а).



а) Калібрування залежності

б) Визначення ПЯ речовини (Q)

а) Калібрування залежності

б) Визначення ПЯ речовини (Q)

$$\varepsilon_{j,k}^{кб}(Q)$$

$$tg\delta_{j,k}^{кб}(Q)$$

Рис. 3. Спрощені графіки визначення ПЯ речовини по дійсній частині її КДП ε' .

Рис. 4. Спрощені графіки визначення ПЯ речовини по значенням її $tg\delta$

Ці калібрувальні характеристики представляємо у вигляді таблиці дискретних значень відповідності КДП заздалегідь відомим ПК речовин. Отримані результати перетворюємо в цифровий код і зберігаємо в пам'яті ЕОМ у вигляді масиву еталонних значень. На другому етапі вимірюємо за допомогою тієї ж апаратури на тих же частотах КДП досліджуваної речовини з ПК, що підлягають визначенню. На третьому етапі проводимо порівняння і оптимізацію даних першого і другого етапів вимірювань з використанням отриманого на першому етапі масиву калібрувальних даних і знайдених на другому етапі даних вимірювань $\varepsilon^{узМ}(Q)$ і $tg\delta^{узМ}(Q)$ досліджуваного невідомої речовини, шляхом зіставлення калібрувальних і вимірних значень: КДП - відповідно ПЯ речовини, як показано на спрощених графіках рис. 3, б і рис. 4, б. На цьому ж етапі визначення шуканого значення ПК речовини (Q), відповідного вимірюваної парі параметрів $\varepsilon^{узМ}(Q)$ і $tg\delta^{узМ}(Q)$, на початку застосовуємо процедуру порівняння і оптимізації вимірних і калібрувальних значень КДП речовини шляхом мінімізації двох цільових функцій за двома параметрами j і k у вигляді:

$$X_{\varepsilon}(Q_k) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\{ \left[\varepsilon_{j,k}^{кб}(Q) - \varepsilon^{узМ}(Q) \right] / \varepsilon^{узМ}(Q) \right\}^2, \quad k = 1, 2, \dots, K,$$

$$X_{\varepsilon}(Q_k) \Rightarrow \min, \tag{9}$$

$$X_{tg\delta}(Q_k) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\{ \left[tg\delta_{j,k}^{кб}(Q) - tg\delta^{узМ}(Q) \right] / tg\delta^{узМ}(Q) \right\}^2, \quad k = 1, 2, \dots, K$$

$$X_{tg\delta}(Q_k) \Rightarrow \min, \tag{10}$$

де j – номери відліків $j = 1, 2, \dots, N$ критеріїв оптимізації $\varepsilon_{j,k}^{кб}(Q)$; $tg\delta_{j,k}^{кб}(Q)$ по вертикальній осі значень (рис. 4, 5); k – номери відліків $k = 1, 2, \dots, K$ шуканих параметрів $Q_{\varepsilon_1}, Q_{\varepsilon_2}, \dots, Q_{\varepsilon_k}$ и $Q_{tg\delta_1}, Q_{tg\delta_2}, \dots, Q_{tg\delta_k}$ по горизонтальній осі цих значень.

З урахуванням мінімальних значень цільових функцій (9) і (10), знаходимо ряд значень ПЯ речовин $Q_{\varepsilon_1}, Q_{\varepsilon_2}, \dots, Q_{\varepsilon_k}$ и $Q_{tg\delta_1}, Q_{tg\delta_2}, \dots, Q_{tg\delta_k}$, які відповідають цим мінімумам.

Далі виробляємо зіставлення відібраних значень ПЯ із загального масиву даних, знайдених при мінімізації (9) зі значеннями ПЯ речовин, знайдених при мінімізації (10) у відповідності з наступною цільовою функцією

$$X(Q_k) = \left| Q_i^r(\varepsilon_{j,k}^{K\bar{b}}) - Q_i^r(\text{tg}\delta_{j,k}^{K\bar{b}}) \right|, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad X(Q_k) \Rightarrow \min, \quad (11)$$

В результаті мінімізації цільової функції (11) отримуємо остаточне значення ПЯ речовини, відповідне початковому значенню його КДП (ε' і $\text{tg}\delta$).

Розглянемо приклад визначення такого ПЯ як питома теплота згоряння (ПТЗ), Дж / кг, одної з горючих речовин таких як вугілля - в залежності від відомого значення його КДП. Відповідно до запропонованих вище трьох етапів визначення ПЯ речовин в залежності від їх КДП на першому етапі отримуємо дискретні калібрувальні залежності між УТС (ε' і $\text{tg}\delta$) і КДП для ряду різних вугілля марки ТК. Ці дискретні значення для зручності пояснення процесу визначення ПЯ апроксимовано гладкими кривими і наведені на рис. 5. Як видно з графіків, в даному випадку КДП різних зразків вугілля значно змінюють свою ПТЗ в межах 20-23 МДж / кг, а саме: крива 1 - $\varepsilon_{j,k}^{K\bar{b}}(Q)$ істотно коливається при зростанні

значення ε' і три рази перетинає горизонтальну пунктирну лінію заданого значення $\varepsilon^{u3M} = 4,4$, а крива 2 - $\text{tg}\delta_{j,k}^{K\bar{b}}(Q)$ наростаючі коливається більш різко і також три рази перетинає задану

горизонтальну пунктирну лінію $\text{tg}\delta^{u3M} = 30 \times 10^{-3}$, що має бути враховано в комп'ютерній програмі визначення ПЯ речовини запропонованим в розділі 3 методом. Відзначимо, що подібна ситуація з коливаннями КДП і УТС вугілля та інших речовин може мати місце на практиці. На другому етапі для визначення ПЯ одного з вугілля марки ТК отримані, наприклад, такі значення КДП $\varepsilon^{u3M} = 4,4$ і $\text{tg}\delta^{u3M} = 30 \times 10^{-3}$ (рівні цих значень відзначені пунктирними горизонтальними лініями на графіках рис. 5). На третьому етапі як показано на спрощених графіках рис. 3, б і рис. 4, б. визначаємо ПЯ відповідного вугілля порівнянням і оптимізацією (мінімізацією) за допомогою цільових функцій (9) і (10) з урахуванням роботи [16]. Результат представлений на графіках (рис.5) вертикальними лініями 1 і 2 зі стрілками на горизонтальній осі: «1» - результат визначення ПТЗ (Q) за допомогою цільової функції (9) і «2» - за допомогою функції (10). Таким чином, за допомогою цільових функцій (9) і (10) знайдені ПЯ вугілля окремо в залежності від заданих параметрів $\varepsilon^{u3M}(Q)$ і $\text{tg}\delta^{u3M}(Q)$, що показано на графіках (рис.5) вертикальними лініями 1 і 2 зі стрілками на горизонтальній осі. Як впливає з графіків, має місце певна різниця між результатами пошуку ПЯ вугілля в залежності від значень його ε' і $\text{tg}\delta$. Ці результати на горизонтальній осі графіків рис. 5 показані дужками «а», «б» і «с». Найменша різниця між найближчими шуканими Q належить скобці «с», що відповідає мінімальному значенню цільової функції (11), призначеної для «об'єднання» значень ПЯ, отриманих в залежності від значень його ε' і $\text{tg}\delta$.

Остаточне рішення даного завдання визначення ПЯ речовини буде шукане значення ПТЗ = 21,7 МДж, що відповідає скобці «с»

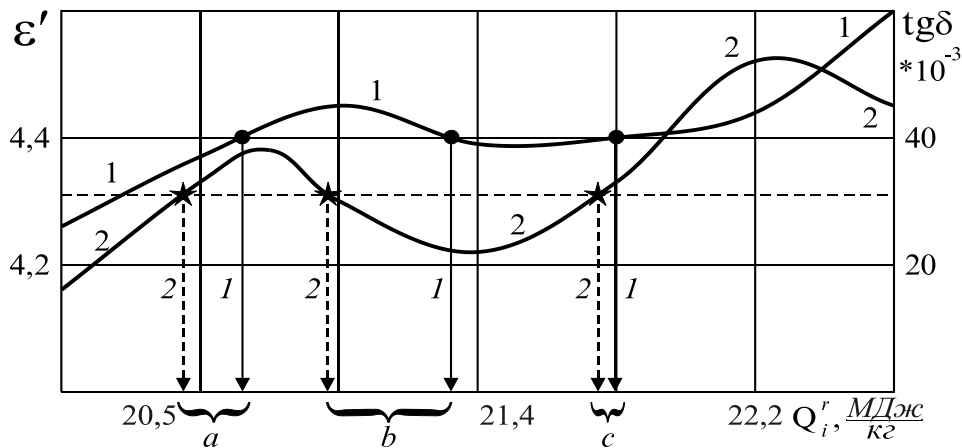


Рис. 5. Експериментальні калібрувальні залежності КДП на частоті 3,43ГГц набору різних вугіль марки ТК в залежності від їх ПТЗ (Q): крива 1 – $\varepsilon_{j,k}^{KB}(Q)$; 2 – $tg\delta_{j,k}^{KB}(Q)$

Різниця між знайденими значеннями ПТЗ (лапки «а», «б» і «с» на графіках рис.5) виникла через похибки вимірювань КДП параметрів поточних і калібрувальних зразків, недостатню кількість варіантів калібрувальних значень в базі даних ПТЗ і малому ступені дискретизації і квантування аналогових даних за допомогою аналого-цифрового перетворювача при записі в цифровому вигляді в пам'ять ЕОМ значень поточних і калібрувальних значень. При цьому очевидно, чим менше інтервали дискретизації і квантування вимірюваних аналогових значень ПТЗ і ПЯ, тим менше будуть інтервали «а», «б» і «с» і менше похибка при визначенні шуканого значення ПЯ речовини для даного ПТЗ.

ВИСНОВКИ

Наведені в статті результати досліджень двох методів визначення КДП речовин, що володіють діелектричними властивостями, показали, що перший відомий хвилеводний метод не зовсім придатний для практичного застосування через неоднозначність одержуваного результату, а другий запропонований метод позбавлений цього недоліку і дозволяє однозначно визначити показник якості речовини по відомим значенням його КДП, для визначення якого досить знати КСХН проби на двох найближчих частотах. Запропонований в статті другий метод контролю якості речовин може бути корисним як в області промисловості, для контролю якості товарів народного споживання, а також для генеруючих енергію підприємств для контролю параметрів вугілля, газу та інших палив, в тому числі визначення октанового числа і забрудненості нафтопродуктів та інших галузей народного господарства. Розроблений метод і його математичне можуть бути застосованими для визначення діелектричної проникності і параметрів якості багатокомпонентних діелектричних сумішей і розчинів [17]. Також може знайти застосування для оцінки ослаблення ЕМ хвилі в різних перешкодах таких як рослинність, будівлі, споруди та інші на шляху її поширення у НВЧ каналах наземного і супутникового радіозв'язку. Реалізація наведених у статті алгоритмів визначення якості речовин, аналого-цифрове перетворення значень КДП і ПЯ речовин, створення електронної таблиці їх значень, запам'ятовування цього масиву, мінімізація цільових функцій і інші операції виконуються за допомогою відповідного програмного забезпечення на ЕОМ. Достовірність і похибка визначення параметрів якості речовин визначається похибкою застосовуваної вимірювальної апаратури, похибкою чисельних розрахунків і параметрами навколишнього середовища.

Автори статті висловлюють подяку к.т.н., доценту Дніпровського національного університету імені О. Гончара Бухарову С.В. за консультації при підготовці статті.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Брандт АА. Исследование диэлектриков на СВЧ. М.: Физматизд, 1964. 404с.
2. Харвей АФ. Техника сверхвысоких частот. Перевод с англ. под ред. Сушкевича ВИ. Т.1. Москва. 1965. 783 с.
3. Борн М, Вольф Э. Основы оптики. Перев. с англ. Под ред. Мотулевича ГП. Издательство «Наука». ГРФМЛ.-Москва. 1973 г.
4. Надь ШБ. Диэлектрометрия. Перев. с венг. под ред. Малова ВВ. Москва: Энергия, 1976. 200 с.
5. Викторов ВА, Викторов ВА, Лункин БВ, Совлуков АС. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. Москва: Энергоатомиздат, 1989, 208 с.
6. Ovsyanikov VV. Measurements of the complex permittivity by the waveguide and resonant cavity methods. Proceedings of the Intern. Confer. on Actual Problems of Measuring Techniq. Kyiv. Ukraine 7-10 Sept 1998. p. 224-225.
7. Gorobets NN, Ovsyanikov VV, Morozov BM, Beznosova ER, Tsytko LZ. Broadband antennas with reactive loads. 9th International Conference UWBUSIS. Sept 4-7 2018. Odessa, Ukraine. p. 353-356.
8. Мищенко СВ, Малков НА. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля материалов. Тамбов: Изд. Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. 128 с.
9. Овсяніков ВВ, Бухаров СВ, Овсяніков ВолВ. Деклараційний патент України на винахід № 71301А. Спосіб експрес-контролю якісних характеристик речовин у НВЧ діапазоні. 15.11.04, Бюл № 11.
10. Куценко ВП, Трегубов НФ. Радиоволновой контроль изделий из диэлектрических материалов. 17th Int. Crimean Confer. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2007). 10-14 September, Sevastopol, Crimea, Ukraine.
11. Куценко ВП, Яненко ОП. Радиометричний неруйнівний контроль діелектричних виробів. Вісник НТУУ «КПІ» Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2010;41:124-131.
12. Кузнецов ГВ, Випанасенко СІ, Овсяніков ВВ, Вовк СМ, Гусев ОЮ, Овсяніков ВолВ, та інші. Патент України на винахід № 90540 С2. Спосіб автоматизованого контролю якісних характеристик речовин у мікрохвильованому діапазоні та пристрій для його реалізації / - 11.05.2010, Бюл. № 9.

13. Бухаров СВ, Овсяніков ВолВ. Діагностика параметрів якості вугілля і рідких нафтопродуктів електромагнітними методами. Стаття Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіопаратобудування. 2011;45:120-129.
14. Сук АФ, Себко ВП, Сучков ГМ, Лазаренко АГ, Музил ВВ, Майстренко АМ. Современные методы неразрушающего контроля в машиностроении. Учебные пособия - НТУ "ХПИ". Харьков. 2012. 173 с.
15. Овсяніков Вл. Система інформаційного забезпечення теплогенеруючих об'єктів показателями якості палива. Тезиси доповіді. Всеукраїнська НІІ конференція молодих учених і студентів «Перспективні напрямки сучасної електроніки ІТ та КС» MEICS – 25-27. 11. 2015. Дніпропетровськ. Україна. С. 91-93.
16. Атрошенко ЛМ, Горобец НН, Сафронова ЛП. Комплексная диэлектрическая проницаемость дисперсных гетерогенных системных компонент. Вісник Харківськ. нац. ун-ту ім.В.Н.Каразіна, №712, Радіофізика та електроніка, 2006;10:10-16.
17. Моисеев НН, Иванілов ЮП, Столярова ЕМ. Методы оптимизации. Москва: Наука, 1978. 352с.

REFERENCES

1. Brandt AA. Research of dielectrics at microwave frequency. Moscow: Fizmatizd, 1964. P. 404. (Russian).
2. Harvey AF. Microwave technology. Translation from English. ed. Sushkevich VI. Vol. 1. Moscow. 1965. p. 783. (Russian).
3. Born M, Wolf E. Fundamentals of optics. Transl. from English. Ed. Motulevich GP. Publishing house "Science". GRFML.-Moscow. 1973. (Russian).
4. Nagy ShB. Dielectrometry. Transl. with Hung. ed. Malova VV. Moscow: Energiya, 1976. p. 200. (Russian).
5. Viktorov VA, Viktorov VA, Lunkin BV, Sovlukov AS. Radio wave measurements of technological process parameters. Moscow: Energoatomizdat, 1989, p. 208. (Russian)
6. Ovsyanikov VV. Measurements of the complex permittivity by the waveguide and resonant cavity methods. Proceedings of the Intern. Confer. on Actual Problems of Measuring Techniq. Kyiv. Ukraine 7-10 Sept 1998. p. 224-225.
7. Gorobets NN, Ovsyanikov VV, Morozov BM, Beznosova ER, Tsytko LZ. Broadband antennas with reactive loads. 9th International Conference UWBUSIS. Sept 4-7 2018. Odessa, Ukraine. p. 353-356.
8. Mishchenko SV, Malkov NA. Design of radio wave (microwave) devices for non-destructive testing of materials. Tambov: Ed. Tamb. state tech. University, 2003.128 p. (Russian).
9. Ovsyanikov VV, Bukharov SV, Ovsyaniov VolV. Declarative patent of Ukraine for the invention № 71301A. Method of express control of quality characteristics of substances in microwave range. 15.11.04, Bull № 11. (Ukrainian).
10. Kutsenko VP, Tregubov NF. Radivolnovoy control of products made of dielectric materials. 17th Int. Crimean Confer. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2007). 10-14 September, Sevastopol, Crimea, Ukraine. (Russian).
11. Kutsenko VP, Yanenko OP. Radiometric non-destructive testing of dielectric products. Bulletin of NTUU "KPI" Series Radio Engineering. Radio equipment. 2010;41:124-131. (Ukrainian).
12. Kuznetsov GV, Vypanasenko SI, Ovsyanikov VV, Vovk SM, Gusev OY, Ovsyanikov VolV, and others. Ukrainian patent for invention № 90540 C2. Method of automated control of qualitative characteristics of substances in microwave range and device for its realization / - 11.05.2010, Bull. № 9. (Ukrainian).
13. Bukharov SV, Ovsyanikov VolV. Diagnosis of quality parameters of coal and liquid oil products by electromagnetic methods. Article Bulletin of NTUU "KPI". Radio Engineering Series. Radio equipment. 2011; 45: 120-129. (Ukrainian).
14. Suk AF, Sebko VP, Suchkov GM, Lazarenko AG, Musil VV, Maistrenko AM. Modern methods of non-destructive testing in mechanical engineering. Textbooks - NTU "KhPI". Kharkov. 2012.173 p. (Russian).
15. Ovsyanikov VI. Information system for providing heat generating facilities with fuel quality indicators. Abstracts of additional information. All-Ukrainian NP conference of young scientists and students "Perspectives in the field of modern electronics IT and KS" MEICS - 25-27. 11. 2015. Dnipropetrovsk. Ukraine. S. 91-93. (Russian).
16. Atroshenko LM, Gorobets NN, Safronova LP. Complex dielectric constant of dispersed heterogeneous system components. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2006;10(712):10-16. (Russian).
17. Moiseev NN, Ivanilov YP, Stolyarova EM. Optimization methods. Moscow: Nauka, 1978.352s. (Russian).