

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra27.02.145>  
УДК 681.5:621.317

**В.В. Овсяніков, О.Р. Безносова**

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара  
72, просп. Гагаріна, Дніпро, 49010, Україна  
E-mail: thalia@i.ua

## ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ РЕЧОВИН НА ПРИКЛАДІ БУДІВЕЛЬНОЇ ЦЕГЛИ

**Предмет і мета досліджень.** Предметом досліджень є параметри якості речовин, які мають діелектричні властивості. Метою є розвиток мікрохвильового дистанційного методу визначення параметрів якості твердих і сипких речовин.

**Методи і методологія.** Застосовано електромагнітний (ЕМ) метод визначення якості речовин шляхом розрахунків і вимірювання послаблення ЕМ-сигналу мікрохвильового діапазону при проходженні його крізь досліджувану речовину, електродинамічний метод багатошарових структур, метод моментів (інтегрального рівняння) і оптимізації цільових функцій. У процесі досліджень здійснювалося попереднє калібрування та запам'ятовування параметрів набору речовин, визначення послаблення ЕМ-хвилі в досліджуваній речовині. Порівняння послаблення ЕМ-хвилі з рядом каліброваних параметрів дозволило оцінювати якість досліджуваної речовини.

**Результати.** Методом багатошарових структур виконано розрахунки послаблення ЕМ-поля в речовині. Ці розрахунки та вимірювання НВЧ-приладом послаблення ЕМ-сигналу в досліджуваній речовині (будівельній цеглі) дозволили одержати і дослідити структурну та математичну моделі визначення якості цієї речовини, оцінити загальний електродинамічний діапазон вимірювального пристрою, обрати для нього оптимальні варіанти передавальних і приймальних антен-датчиків та вимірювальної НВЧ-апаратури. Методом моментів розраховано тривимірні діаграми направленості ЕМ-поля поблизу пристрою і коефіцієнт підсилення антен-датчиків у складі пристрою, що дозволило оцінити взаємний ЕМ-вплив антен-датчиків і досліджуваної речовини.

**Висновки.** Подальше дослідження запропонованого методу передбачає уточнення структурної і математичної моделей визначення якості речовин, загального динамічного діапазону вимірювального пристрою, різновидів вимірювальної НВЧ-апаратури, забезпечення автоматизації контролю параметрів якості речовин у режимі реального часу (наприклад, на конвеєрі) при дотриманні екологічних норм НВЧ-випромінювання поблизу пристрою.

**Ключові слова:** якісна характеристика речовини, мікрохвильовий метод, послаблення ЕМ-хвилі в речовині, діаграма направленості антени-датчика, оптимізація цільових функцій.

### Вступ

Речовиниздіелектричними властивостями широко використовуються в багатьох галузях промисловості — гірничодобувній, металургійній, ма-

шинобудівній, будівельній та ін. З цієї причини неруйнівне визначення параметрів якості таких речовин є вельми актуальною проблемою. На цей час для її вирішення застосовують різні ме-

Ц и т у в а н н я: Овсяніков В.В., Безносова О.Р. Дослідження можливості дистанційного контролю якості речовин на прикладі будівельної цегли. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2022. Т. 27. № 2. С. 145–152. <https://doi.org/10.15407/rpra27.02.145>  
Citation: Ovsyanikov, V.V., and Beznosova, O.R., 2022. A Possibility of Remote Quality Control of Materials: Building Bricks as an Example. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 27(2), pp. 145–152. <https://doi.org/10.15407/rpra27.02.145>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2022. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2022. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

тоди контролю якості речовин — інфрачервоні, нейронні, теплові, радіаційні, електричні, радіотехнічні.

У дослідження принципів радіотехнічної мікрохвильової діагностики речовин великий внесок зробили радянські вчені (Л.М. Бреховських, А.А. Брандт, В.А. Вікторов, Б.В. Лункін, А.С. Совлуков, В.В. Нікольський), а також закордонні дослідники (М. Борн, Е. Вольф, Ш.Б. Надь, А.Ф. Харвей та ін.) [1–17].

У цій роботі з використанням методу багатшарових плоскошаруватих структур [3, 4] виконано розрахунки послаблення електромагнітної (ЕМ) хвилі у НВЧ-діапазоні для деяких матеріалів та речовин. Зокрема, розраховано послаблення ЕМ-поля у звичайній будівельній цеглі і для цього випадку зроблено експериментальну перевірку послаблення поля з використанням автоматизованого вимірювача коефіцієнта стоячої хвилі за напругою та послаблення типу Р2. Ці розрахунки та вимірювання дозволили запропонувати структурну й математичну моделі пристрою для вимірювання і визначення послаблення ЕМ-сигналу в речовині та її якісного параметра, визначити оптимальні типи антен-датчиків та вимірювальної НВЧ-апаратури.

З використанням більш точного методу моментів (інтегрального рівняння) [17] було розраховано діаграми направленості (ДН) і коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен-датчиків для цього пристрою як в автономному режимі, так і для спільної їх роботи у складі даного пристрою. Остаточне визначення параметра якості речовини з використанням заздалегідь одержаного набору каліброваних значень цього параметра для серії речовин запропоновано робити з використанням методу оптимізації цільових функцій [12–14].

### 1. Дослідження послаблення ЕМ-хвилі у речовині, яка перебуває у напівнескінченному просторі

У роботах [3, 4] на основі рівнянь електродинаміки і теорії багатшарових діелектричних структур одержано вирази для коефіцієнтів відбиття і послаблення ЕМ-хвилі при поширенні її в речовинах. Беручи до уваги дані роботи [3], вирази для комплексних коефіцієнтів послаблення  $t$  і відбиття  $r$  ЕМ-хвилі при її падінні на шар

речовини товщиною  $d$  (рис. 1), сумірною з довжиною ЕМ-хвилі, мають вигляд:

$$t_{12} = \frac{n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} = \frac{2p_1}{p_1 + p_2}; \quad (1)$$

$$t_{23} = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_2 + n_3 \cos \theta_3} = \frac{2p_2}{p_2 + p_3}; \quad (2)$$

$$r_{12} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} = \frac{p_1 - p_2}{p_1 + p_2}; \quad (3)$$

$$r_{23} = \frac{n_2 \cos \theta_2 - n_3 \cos \theta_3}{n_2 \cos \theta_2 + n_3 \cos \theta_3} = \frac{p_2 - p_3}{p_2 + p_3}, \quad (4)$$

де

$$n_K = \sqrt{\epsilon'_K - i\epsilon''_K} \quad (5)$$

показник заломлення речовини;

$$\epsilon_K = \epsilon'_K - i\epsilon''_K \quad (6)$$

комплексна діелектрична проникність речовини.

Тоді вираз для комплексного коефіцієнта послаблення ЕМ-хвилі, яка проходить крізь тришарову структуру, з урахуванням значень коефіцієнтів з формул (1)–(6) матиме вигляд:

$$t = \frac{t_{12} t_{23} e^{i\beta}}{1 + r_{12} r_{23} e^{i\beta}}, \quad (7)$$

де

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 d \cos \theta_2. \quad (8)$$

З урахуванням формул (1)–(8) загальний кінцевий вираз для послаблення ЕМ-енергії в тришаровій структурі (рис. 1) записується у вигляді

$$T = \frac{p_2}{p_1} |t|^2 = \frac{n_2 \cos \theta_2 t_{12}^2 t_{23}^2}{n_1 \cos \theta_1 (1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12} r_{23} \cos 2\beta)}, \quad (9)$$

де  $p_K = \sqrt{\epsilon_K} \cos \theta_K$  — коефіцієнти для трьох шарів речовин  $K = 1, 2, 3$ .

Цей вираз разом з формулами (1)–(8) було використано у розрахунках послаблення ЕМ-хвилі  $T$  для чотирьох варіантів зразків (рис. 2) з однаковою дійсною частиною відносної діелектричної проникності ( $\epsilon_1 = 4.5$ ) і різними значення-

ми уявної частини в досліджуваному частотному діапазоні 3.2...4.7 ГГц для  $\theta_1 = 0$  і товщини шару досліджуваної речовини  $d = 0.13$  м (рис. 1).

Також експериментально досліджено послаблення ЕМ-хвилі у звичайній будівельній цеглі ( $\text{tg } \delta = 0.024$ , варіант 2 — показано точками на рис. 2) з використанням автоматизованого вимірювача коефіцієнта стоячої хвилі за напругою та послаблення типу Р2. Результати розрахунків і вимірювань наведено на рис. 2.

Оцінюючи отримані результати вимірювань варіанта 2 (рис. 2, точки), можна зазначити, що вони узгоджуються з розрахунками послаблення в діапазоні частот (крива 2), але це відбувається при контакті з досліджуваною речовиною джерела і приймача ЕМ-енергії ( $H_1 = H_2 = 0$ , рис. 3).

Очевидно, що у реальному випадку наявність щільного контакту антен-датчиків з досліджуваною речовиною унеможливує рух речовини між антенами-датчиками (наприклад, на конвеєрі).

Дослідження спрощеної моделі (рис. 1 та 2) дозволило відповісти на низку питань, пов'язаних зі створенням структурної і математичної моделей пристрою для визначення якості речовини. Зокрема, результати досліджень дали можливість оцінити динамічний діапазон послаблення ЕМ-хвиль між антенами-датчиками в заданому діапазоні частот для шарів речовин різної товщини, що важливо для вибору типів і конструкції антен-датчиків, відстані між ними та визначення параметрів необхідного вимірювального мікрохвильового приладу.

З результатів дослідження моделі (рис. 1) випливає, що певні зміни уявної частини діелектричної проникності  $\epsilon''$  речовини, які залежать від втрат у ній ЕМ-енергії [1–19], характеризують певні фізичні властивості — якість досліджуваної речовини (рис. 2). Така кореляція між якістю речовини, її діелектричною проникністю і послабленням ЕМ-хвилі в ній підтверджує можливість дистанційного контролю якісних показників речовин.

## 2. Дослідження послаблення ЕМ-хвилі при деякій відстані антен-датчиків від досліджуваної речовини

Наближаючи спосіб дослідження речовин до реальних умов вимірювання послаблення і визна-

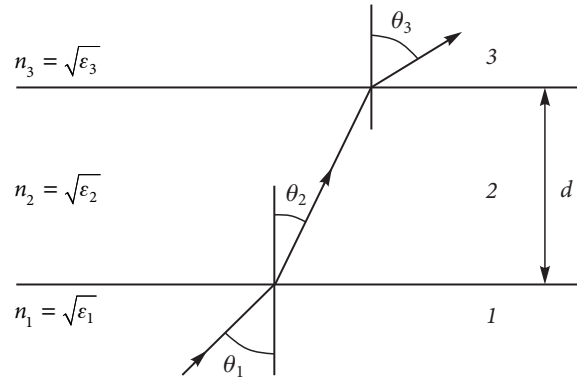


Рис. 1. Тришарова діелектрична структура у напівнескінченному просторі: 1 — повітря; 2 — досліджувана речовина; 3 — повітря

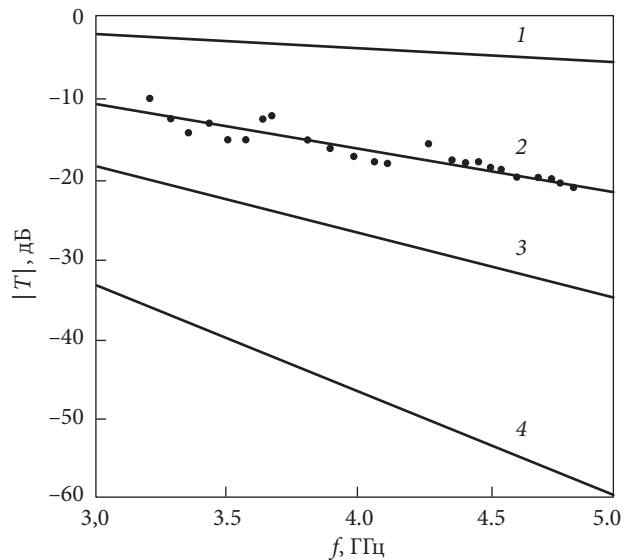


Рис. 2. Розрахункові та експериментальні частотні залежності коефіцієнта послаблення ЕМ-хвилі в речовинах: 1 —  $\epsilon_1 = 4.5 - i 0.08$ ; 2 —  $\epsilon_2 = 4.5 - i 0.11$  ( $\text{tg } \delta = 0.024$ ) (точки — результати вимірювань для варіанта 2); 3 —  $\epsilon_3 = 4.5 - i 0.14$ ; 4 —  $\epsilon_4 = 4.5 - i 0.19$

чення якості речовини, одержимо вигляд структурної моделі пристрою для визначення якості речовин (рис. 3). За наявності зазорів  $H_1$  і  $H_2$  між антенами-датчиками та досліджуваною речовиною ЕМ-поле поблизу пристрою має складну конфігурацію і не піддається опису за спрощеною моделлю (рис. 1). З огляду на це, за допомогою потужного програмного комплексу FEKO, з використанням методу моментів (інтегрального рівняння) [17] було виконано розрахунки тривимірних діаграм направленості (ДН) і коефіцієнта підсилення (КП) рупорних антен-датчиків пристрою (рис. 4) та для моделі пристрою у

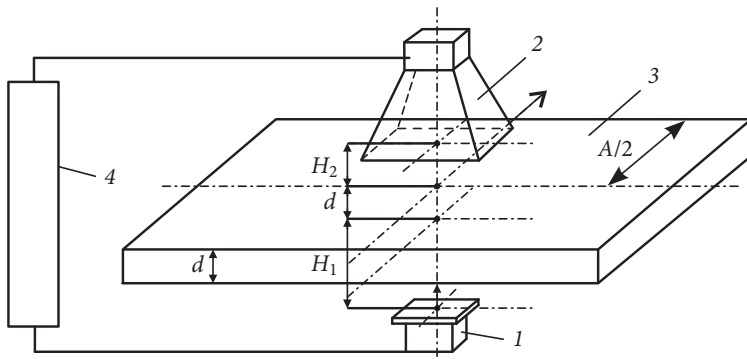


Рис. 3. Пристрій для вимірювання послаблення ЕМ-сигналу в речовині та її якісного параметра: 1 і 2 — рупорні антени-датчики для випромінювання і приймання ЕМ-сигналу, відповідно; 3 — досліджувана речовина; 4 — вимірювально-обчислювальний блок

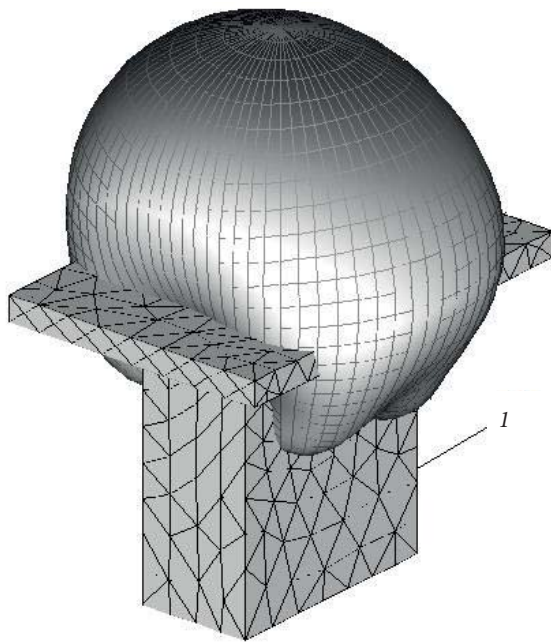


Рис. 4. Тривимірний ДН розподілу ЕМ-поля навколо мікрохвильового датчика 1 в дальній зоні вільного простору (центральна частота робочого діапазону — 3 ГГц, КП — близько 6 дБ)

повному складі з антенами-датчиками (рис. 5) у вільному просторі.

У результаті розгляду діаграм (рис. 4 і 5) можна зробити висновок, що наявність досліджуваної речовини поблизу антен-датчиків і мала відстань між ними істотно змінюють картину ЕМ-поля. Однак ДН приймально-передавальних антен-датчиків залишаються симетричними щодо загальної вертикальної осі, що проходить через досліджувану речовину, і осі симетрії рупорних антен датчиків.

Зменшити вплив датчиків і речовини на тривимірну ДН поблизу пристрою (рис. 3) мож-

на шляхом віддалення датчиків від речовини 3, тобто збільшення габаритних розмірів вимірювального пристрою. Це, на жаль, призводить до зниження рівня ЕМ-сигналу на вході приймальної антени-датчика, розсіювання ЕМ-випромінювання навколо основного напрямку випромінювання (приймання) та впливу на ДН пристрою сусідніх конструкцій (кабелів та інших другорядних елементів), а отже, до спотворення структури ЕМ-поля поблизу вимірювальної системи (рис. 3). Збільшення відстаней рупорних антен-датчиків від речовини також призводить до зменшення енергетики радіолінії між антенами-датчиками і речовиною, зменшення потужності інформаційного сигналу, отриманого приймальною антеною-датчиком 2 від антени-датчика 1 і, отже, внесе додаткову похибку в результати вимірювань.

Крім того, при збільшенні потужності мікрохвильової енергії, що випромінюється антеною-датчиком 1, збільшення її відстані від речовини може призвести до погіршення екологічної ситуації навколо вимірювального пристрою (рис. 3).

### 3. Визначення якості речовини залежно від комплексного коефіцієнта послаблення ЕМ-хвилі в ній

Дистанційний метод визначення якості речовин у вільному просторі, на відміну від хвилевідного методу [19], передбачає використання комплексного коефіцієнта послаблення  $T$  (7)–(9) замість комплексного коефіцієнта відбиття  $R$ , хоча математична модель обробки даних частково повторює наведену в роботі [19].

Для підвищення точності одержаних результатів (послаблення ЕМ-хвилі  $T$  і параметр якості

речовини) пропонується дослідження речовин виконувати експериментально-розрахунковим методом за допомогою пристрою (рис. 3) з ЕОМ.

Скористаємося методом порівняння значення послаблення ЕМ-хвилі  $T_H(f_j)$  в заданому частотному діапазоні речовини з невідомим параметром якості з набором калібрувальних (еталонних) даних щодо послаблення ЕМ-хвилі  $T_K$ , створеним заздалегідь у тому ж частотному діапазоні. Параметр якості досліджуваного зразка визначаємо спільною математичною обробкою отриманих експериментальних даних з використанням процедур оптимізації [9, 12, 13].

На першому етапі визначення якості речовини проводимо калібрування. Для цього вимірюємо, наприклад, на конвеєрі в дискретному діапазоні частот за допомогою мікрохвильового обладнання комплексний коефіцієнт послаблення хвилі для набору речовин  $T_K (T_1, T_2, \dots, T_M)$  з послабленням  $T_{K_i}$ , де  $i = 1, 2, 3, \dots, M$  — кількість речовин, що використовуються на підприємстві, і створюємо масив даних калібрування  $\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M T_K(f_j, K_i)$ , де  $j = 1, 2, 3, \dots, N$  — кількість дискретних частот у робочому діапазоні.

Ці дані зберігаємо в пам'яті комп'ютера у вигляді таблиці відповідності кожної частотної залежності коефіцієнта послаблення  $T_{K_i}$  речовини кожному заздалегідь визначеному відповідному параметру її якості (наприклад, ступеню вологості, калорійності, зольності речовин тощо).

На рис. 6 представлено спрощені графіки частотних залежностей відносних значень калібрувальних коефіцієнтів послаблення  $T_K(f_j)$  (криві 1, 2, 4, 5) і відносного значення коефіцієнта послаблення  $T_H(f_j)$  (крива 3) для досліджуваної речовини з невідомим параметром якості. Графіки (рис. 6) умовно зображені поверх відповідних вертикальних реальних амплітуд коефіцієнтів для дискретних частот досліджуваного діапазону 3.2...4.7 ГГц.

На другому етапі на вході пристрою отримуємо частотну залежність послаблення ЕМ-хвилі  $T_H(f_j)$  в діапазоні  $N$  дискретних частот для речовини з невідомим параметром якості і запам'ятаємо її. Цю залежність додатково показано на калібрувальних графіках (рис. 6, крива 3).

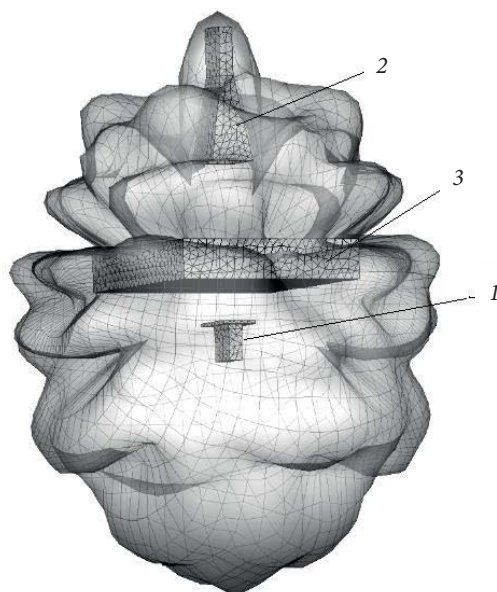


Рис. 5. Тривимірний розподіл ЕМ-поля навколо пристрою (частота — 3 ГГц;  $H_1 = 100$  мм;  $H_2 = 300$  мм;  $d = 0.13$  м;  $\epsilon = 4.5$ ; КП кожної з антен-датчиків — близько 10 дБ): 1 і 2 — рупорні антени-датчики; 3 — досліджувана речовина

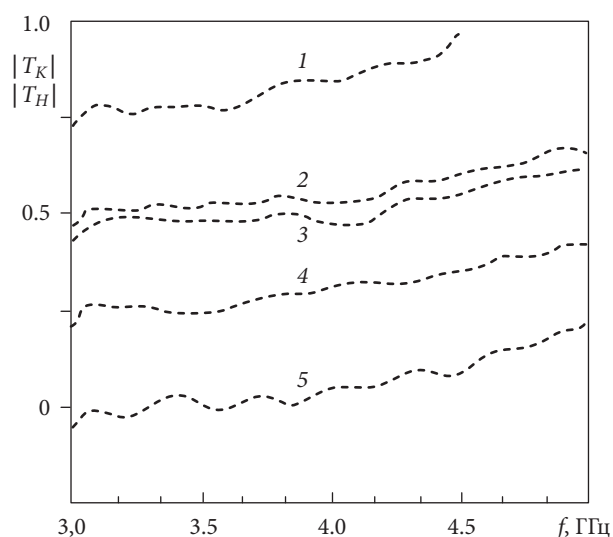


Рис. 6. Спрощені калібрувальні графіки частотної залежності відносних значень коефіцієнта послаблення для набору речовин: 1 —  $T_K(f_j, K_1)$ ; 2 —  $T_K(f_j, K_2)$ ; 3 —  $T_H(f_j)$ ; 4 —  $T_K(f_j, K_i)$ ; 5 —  $T_K(f_j, K_M)$

На третьому, останньому, етапі виконуємо порівняльний аналіз і обробку даних першого та другого етапів за допомогою системи рівнянь (10), використовуючи масив даних калібрування (рис. 6), для визначення бажаної калібрувальної частотної характеристики послаблення однієї з усіх  $M$  речовин, що є найближчою до частотної характеристики послаблення  $T_H(f_j)$  речовини

з невідомим параметром якості, і виконуємо пошук мінімумів цільових функцій  $Z_i(K_j)$ :

$$\begin{aligned}
 (i=1) \quad Z_1(K) &= \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\{ (T_H(f_j) - T_K(f_j, K_1)) / T_K(f_j, K_1) \right\}^2, \\
 (i=2) \quad Z_2(K) &= \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\{ (T_H(f_j) - T_K(f_j, K_2)) / T_K(f_j, K_2) \right\}^2, \\
 (i=(M-1)) \quad Z_{(M-1)}(K) &= \tag{10} \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\{ (T_H(f_j) - T_K(f_j, K_{(M-1)})) / T_K(f_j, K_{(M-1)}) \right\}^2, \\
 (i=M) \quad Z_M(K) &= \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\{ (T_H(f_j) - T_K(f_j, K_M)) / T_K(f_j, K_M) \right\}^2, \\
 Z_i(K_j) &\Rightarrow \min,
 \end{aligned}$$

де  $T_{K_i}(f_j, K_i)$  — частотна дискретна характеристика послаблення каліброваної речовини  $K_i$ ;  $M$  — кількість речовин у калібрувальній таблиці;  $N$  — кількість дискретних частот у досліджуваному діапазоні;  $T_H(f_j)$  — частотна дискретна характеристика послаблення в речовині з невідомим параметром якості.

Алгоритм визначення якості речовин, що відповідає вищенаведеним трьома етапам дослідження речовин і системі рівнянь (10), розміщується в пам'яті ЕОМ, яка входить до складу пристрою (рис. 3, поз. 4).

Одержане за системою рівнянь (10) і каліброваними даними (рис. 6) мінімальне значення однієї з  $M$  цільових функцій  $Z_i(K)$  свідчить про те, що досліджувана речовина  $K_H$  з частотною дискретною характеристикою послаблення  $T_H(f_j)$  має залежність послаблення, найближчу до однієї з калібрувальних характеристик, а саме до  $T_{K_i}(f_j, K_2)$  (рис. 6, крива 2), що впливає з калібрувальної цифрової таблиці, створеної на першому етапі (див. розд. 3). Така ситуація показана на рис. 6 у вигляді близько розташованих кривих 2 і 3.

З урахуванням частотної залежності  $T_{K_i}(f_j, K_2)$ , яка є повною фізичною характеристикою послаблення ЕМ-хвилі, близькою до характеристики послаблення  $T_H(f_j)$ , можна зробити висновок, що задачу визначення послаблення ЕМ-хвилі в речовині  $T_H$  вирішено. Далі з урахуванням тієї ж цифрової калібрувальної таблиці, яка відповідає графікам (рис. 6), знаходимо шуканий параметр якості будь-якої речовини (ступінь вологості, калорійності, зольності та ін.).

## Висновки

Методом багат шарових структур виконано розрахунки послаблення ЕМ-поля в речовині. Ці розрахунки та вимірювання НВЧ-приладом послаблення ЕМ-сигналу (для прикладу — в будівельній цеглі) дозволили одержати і дослідити структурну та математичну моделі пристрою для визначення якості досліджуваної речовини, оцінити загальний електродинамічний діапазон вимірювального пристрою та обрати для нього оптимальні варіанти передавальних і приймальних антен-датчиків та вимірювальної НВЧ-апаратури. Методом моментів (інтегрального рівняння) розраховано тривимірні діаграми направленості ЕМ-поля поблизу пристрою і коефіцієнт підсилення антен-датчиків у складі пристрою, що дозволило оцінити взаємний ЕМ-вплив антен-датчиків і досліджуваної речовини. Запропоновано математичну модель визначення якості речовини.

Подальше дослідження запропонованого методу передбачає уточнення структурної і математичної моделей визначення якості речовин, загального динамічного діапазону вимірювального пристрою, різновидів вимірювальної НВЧ-апаратури, забезпечення автоматизації контролю параметрів якості речовин у режимі реального часу (наприклад, на конвеєрі) при дотриманні екологічних норм НВЧ-випромінювання поблизу пристрою.

*Автори висловлюють подяку доценту Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара С.В. Бухарову та аспіранту В.В. Овсянікову за плідну співпрацю за темою статті.*

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Брандт А.А. *Исследование диэлектриков на СВЧ*. Москва: Физматгизд, 1964. 404 с.
2. Харвей А.Ф. *Техника сверхвысоких частот*. Пер. с англ. под ред. В.И. Сушкевича. Т.1. Москва: Сов. радио, 1965. 783 с.
3. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики*. Пер. с англ. под ред. Г.П. Мотулевича. Москва: Наука, 1973.
4. Бреховских Л.М. *Волны в слоистых средах*. Москва: Наука, 1973. 343 с.
5. Надь Ш.Б. *Диэлектрометрия*. Пер. с венг. под ред. В.В. Малова. Москва: Энергия, 1976. 200 с.
6. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. *Радиоволновые измерения параметров технологических процессов*. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 208 с.
7. Ovsyanikov V.V. Measurements of the complex permittivity by the waveguide and resonant cavity methods. *Proc. Int. Conf. on Actual Problems of Measuring Technique*. Kyiv, Ukraine, 7–10 Sept. 1998. P. 224–225.
8. Мищенко С.В., Малков Н.А. *Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля материалов*. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. 128 с.
9. *Спосіб експрес-контролю якісних характеристик речовин у НВЧ діапазоні*: пат. 71301А, Україна: МПК 7G01N 22/00/ В.В. Овсяніков, С.В. Бухаров, Вол.В. Овсяніков. Опубл. 15.11.2004. Бюл. № 11.
10. Атроненко Д.М., Горобец Н.Н., Сафронова Л.П. Комплексная диэлектрическая проницаемость дисперсионных гетерогенных системных компонент. *Вісник Харківськ. нац. ун-ту імені В.Н. Каразіна. Сер. Радіофізика та електроніка*. 2006. Вип. 712. С. 10–16.
11. Овсяніков Вол.В. Контроль якості сипучих речовин шляхом частотного НВЧ сканування. *Міжнарод. научн.-техн. конф. студентів, аспірантів та учених «Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникации»*: тез. докл. (Севастополь, Україна, 17–21 апреля 2006). Севастополь: Изд-во Севастопольск. техн. ун-та, 2006. С. 310–311.
12. Моисеев Н.Н., Иванилов Ю.П., Столярова Е.М. *Методы оптимизации*. Москва: Наука, 1978. 352 с13.
13. *Спосіб автоматизованого контролю якісних характеристик речовин у мікрохвильовому діапазоні та пристрій для його реалізації*: пат. 90540, Україна: МПК G01N 22/00 / Г.В. Кузнецов, С.І. Випанасенко, В.В. Овсяніков, С.М. Вовк, О.Ю. Гусев, Вол.В. Овсяніков, Г.І. Фесак, С.В. Мартиненко. № а200805021; заявл. 18.04.2008, опубл. 11.05. Бюл. №9. 6 с.
14. Овсяніков В.В. Експрес-контроль якості вугілля радіометричним методом. *Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2010. Вип. 43. С. 24–32.
15. Бухаров С.В., Овсяніков В.В. Диагностика параметров качества угля и жидких нефтепродуктов электромагнитными методами. *Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2011. Вип. 45. С. 120–129.
16. Сук А.Ф., Себко В.П., Сучков Г.М., Лазаренко А.Г., Мусил В.В., Майстренко А.М. *Современные методы неразрушающего контроля в машиностроении*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. 173 с.
17. *Вычислительные методы в электродинамике*. Под ред. Р. Митры. Пер. с англ. под ред. Э.Л. Бурштейна. Москва: Мир, 1977. 488 с.
18. Бухаров С.В., Овсяніков В.В. Определение качества веществ электромагнитными методами. *Міжнар. он-лайн науково-техн. конф. «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи» (РТПАСС'2014)*. Київ, КПІ. 10–16 березня 2014.
19. Овсяніков В.В., Горобець М.М., Безносова О.Р. Контроль якості речовин електронним зондуванням у хвилеводі. *Вісник Харківськ. нац. ун-ту імені В.Н. Каразіна. Сер. Радіофізика і електроніка*. 2020. Вип. 32. С. 61–70.

Стаття надійшла 05.10.2021

REFERENCES

1. Brandt, A.A., 1964. *Research of dielectrics at microwave frequency*. Moscow, USSR: Fizmatizd Publ. (in Russian).
2. Harvey, A.F., 1965. *Microwave technology*. Transl. from English by V.I. Sushkevich. Vol. 1. Moscow, USSR: Sov. radio Publ. (in Russian).
3. Born, M., Wolf, E., 1973. *Fundamentals of optics*. Transl. from English. by G.P. Motulevich. Moscow, USSR: Publ. House "Science" (in Russian).
4. Brekhovskih, L.M., 1973. *Waves in layered media*. Moscow, USSR: Nauka Publ. (in Russian).
5. Nad', Sh.B., 1976. *Dielectrometry*. Transl. from Hungarian by V.V. Malov. Moscow, USSR: Energiya Publ. (in Russian).
6. Viktorov, V.A., Lunkin, B.V., Sovlukov A.S., 1989. *Radio wave measurements of parameters of technological processes*. Moscow, USSR: Energoatomizdat (in Russian).
7. Ovsyanikov, V.V., Measurements of the complex permittivity by the waveguide and resonant cavity methods. In: *Proc. Int. Conf. on Actual Problems of Measuring Technique*. Kyiv, Ukraine, 7–10 Sept. 1998.
8. Mishchenko, S.V., Malkov, N.A., 2003. *Design of radio wave (SHF) devices of nondestructive testing of materials*. Tambov: Tambov State Technical University Publ. (in Russian).
9. Ovsyanikov, V.V., Bukharov, S.V., Ovsyanikov, Vol.V., 2004. *Method of express control of quality characteristics of substances in microwave range*. Ukraine. Pat. 71301 (in Ukrainian).
10. Atronenko, D.M., Gorobets, N.N., Safronova, L.P., 2006. Complex permittivity of dispersion heterogeneous system components. *Вісник V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radiophysics and Electronics"*, 712, pp. 10–16 (in Russian).
11. Ovsyanikov, Vol.V., 2006. Quality control of bulk solids by the method of SHF scanning. In: *Proc. Int. Sci. Tech. Conf. "Youth and modern problems of radio engineering and telecommunications"*. Sevastopol, Ukraine, 17–21 April, 2006. Sevastopol: Sevastopol State University Publ. (in Ukrainian).

12. Moiseev, N.N., Ivanilov, Y.P., Stolyarova, E.M., 1978. *Optimization methods*. Moscow, USSR: Nauka Publ. (in Russian).
13. Kuznetsov, G.V., Vyranasenko, S.I., Ovsianikov, V.V., Vovk, S.M., Gusiev O.Yu., Ovsianikov, Vol.V., Fesak, H.I., Martynenko, S.V., 2010. *Method for automated control of qualitative characteristics of substances in micro-wave range and device for its realization*. Ukraine. Pat. 90540 (in Ukrainian).
14. Ovsyanikov, V.V., 2010. Express control of coal quality by the radiometric method. *Bull. NTUU "KPI", series "Radio Engineering. Radio Instrument Making"*, 43, pp. 24–32 (in Ukrainian).
15. Bukharov, S.V., Ovsyanikov, V.V., 2011. Quality parameter diagnostics of coal and liquid oil products by electromagnetic methods, *Bull. NTUU "KPI", series "Radio Engineering. Radio Instrument Making"*, 45, pp. 120–129 (in Russian).
16. Suk, A.F., Sebko, V.P., Suchkov, G.M., Lazarenko, A.G., Musil, V.V., Maistrenko, A.M., 2012. *Modern methods of non-destructive testing in mechanical engineering*. Kharkov: NTU "KhPI" Publ. (in Russian).
17. Mitra, R. ed., 1977. *Computational methods for electromagnetics*. Transl. from English by E.L. Burshtein. Moscow, USSR: Mir Publ. (in Russian).
18. Bukharov, S.V., Ovsyanikov, V.V., 2014. Determination of quality of materials by electromagnetic methods. In: *Proc. Int. Sci. Tech. Conf. "Radioengineering Fields, Signals, Devices and Systems" (RTPSAS'2014)*, Kyiv, Ukraine, 10–16 March 2014. Kyiv: KPI Publ. (in Russian).
19. Ovsyanikov, V.V., Gorobets, M.M., Beznoсова, O.R., 2020. Quality control of substances by electronic sounding in a waveguide. *Bull. V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radiophysics and Electronics"*, 32, pp. 61–70 (in Ukrainian).

Received 05.10.2021

V.V. Ovsyanikov, and O.R. Beznoсова

Oles Honchar Dnipro National University  
72, Gagarin Ave., Dnipro, 49010, Ukraine  
E-mail: thalia@i.ua

#### A POSSIBILITY OF REMOTE QUALITY CONTROL OF MATERIALS: BUILDING BRICKS AS AN EXAMPLE

**Subject and Purpose.** The subject of this research relates to quality parameters of substances with dielectric properties, while the main aim is development of a microwave-band remote sensing technique for measuring quality parameters of solids and loose materials.

**Methods and Methodology.** The work is based on electromagnetic methods for determining substance quality by means of calculations and measurements of microwave signal attenuation in the substance of interest. The methods employed involve electrodynamic analysis of multilayered structures, the analytical method of moments, integral equations of diffraction theory, and objective function optimization. For a certain set of substances, preliminary calibrations and parameter storage are performed, intended for use in the determination of electromagnetic wave attenuation in the substance of interest. By comparing electromagnetic wave attenuation in the substance under testing with correspondent values shown by pre-calibrated samples, with their sets of parameters, it is possible to judge on the quality of the material under consideration.

**Results.** By applying diffraction-theoretic methods of wave analysis in multilayered structures, the electromagnetic field attenuation in a substance (building bricks) has been calculated. The calculated results concerning electromagnetic signal attenuation in the test substance were compared with corresponding microwave measurements, thus permitting construction of the structural and mathematical model for the determination of the substance (building bricks) quality. The studies made it possible to evaluate the overall electrodynamic range of the measuring device, choosing the best options for the transmit and receive antenna sensors and the measuring equipment. The method of moments has been used to derive three-dimensional radiation patterns in the proximity of the device and the gain factor of the antenna sensors, wherefrom estimating the mutual electromagnetic effect that the sensors and the test substance may have on each other.

**Conclusion.** Further development of the proposed method may imply refinement of the structural and mathematical models underlying estimation of quality parameters, determination of the overall dynamic range of the microwave-band measuring device, and provisions for automated real-time quality control and monitoring (for instance, on a conveyor), while maintaining conformance to applicable eco-standards concerning microwave intensity levels produced by the device.

**Keywords:** quality characteristic of a substance, microwave techniques, electromagnetic wave attenuation, antenna radiation pattern, objective function optimization.