

УДК 621.317

## АВТОМАТИЗОВАНИЙ ВИМІРЮВАЧ КОЕФІЦІЄНТА ВІДБИТТЯ У СМУЗІ ПОГЛИНАННЯ

<sup>1</sup>Скрипник Ю.О., <sup>1</sup>Шевченко К.Л., <sup>2</sup>Іващенко В.О., <sup>2</sup>Яненко О.П., <sup>1</sup>Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, Україна,  
<sup>2</sup>НДЦ КМ "Відгук" МОЗ України, м. Київ, Україна

*В статті розглянутий спосіб та пристрій для вимірювання коефіцієнта відбиття, що забезпечують підвищення точності в широкій смузі частот НВЧ-діапазону*

### Вступ. Постановка задачі

Вимірювання коефіцієнта поглинання та відбиття є актуальною задачею для наукових і технічних досліджень об'єктів живої і неживої природи в зовнішніх електромагнітних полях, в тому числі в біології, медицині, фізиці, технологічних вимірюваннях властивостей матеріалів і речовин.

У діапазоні НВЧ радіохвиль у вологих матеріалах спостерігається сильне поглинання електромагнітної енергії в області дисперсії комплексної провідності. Максимум поглинання має місце на частотах релаксації, коли частота зовнішнього поля співпадає з власною частотою диполей, які створені молекулами води. Коефіцієнт відбиття, який має мінімальне значення на частоті релаксації, збільшується в процесі сушіння матеріалів і виробів в НВЧ полі. Тому по коефіцієнту відбиття визначають остаточну вологість матеріалу, який висушується. Таким чином, коефіцієнт відбиття в смузі поглинання є важливим технологічним параметром, що дозволяє оптимізувати процес сушіння матеріалів і виробів в НВЧ-печах і іншому надвисокочастотному технологічному електрообладнанні.

Відомі способи та засоби вимірювання коефіцієнта відбиття, наведені, наприклад, в [1, 2, 3] мають значні похибки та не забезпечують зрослі вимоги технічних та наукових досліджень.

Метою даної роботи є створення способу і пристрою визначення коефіцієнта відбиття в смузі поглинання, що здійснюють автоматичний вимір відношення мінімальної амплітуди відбитих НВЧ-коливань до амплітуди падаючих НВЧ-коливань. Це підвищує точність виміру коефіцієнта відбиття в центрі смуги поглинання [4, 5].

### Опис технічного рішення

На рис. 1 зображено структурну схему пристрою, який реалізує розроблений спосіб, а на рис. 2 – частотні залежності коефіцієнта відбиття у смузі поглинання і відповідні епюри низькочастотних сигналів.

Початкові НВЧ коливання генератора 19 (рис. 1) поділяються по фазі на 90° квадратурним фазорозчеплювачем 20, створюючи на його виході два ортогональних коливання:

$$U_1(t) = a_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1), \quad (1)$$

$$U_2(t) = a_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1), \quad (2)$$

де  $a_1, \omega_1$  і  $\varphi_1$  – амплітуда, частота і фаза НВЧ коливань.

Колівання (1) і (2) модулюються по амплітуді в НВЧ модуляторах 21 і 22 низькочастотними коливаннями генератора 26, які також розділяються по фазі на  $90^\circ$  квадратурним фазорозчеплювачем 24:

$$U'_3(t) = A \cos(\Omega t + \Phi_1), \quad (3)$$

$$U'_4(t) = A \sin(\Omega t + \Phi_1), \quad (4)$$

де:  $A_1, \Omega_1$  і  $\Phi_1$  – амплітуда, частота і фаза низькочастотних коливань.

Низьку частоту  $\Omega_1$  обирають рівній половині смуги поглинання  $\Delta\omega$  середовища, що опромінюється (рис. 2, а), тобто частота модуляції  $\Omega_1 = \Delta\omega/2$ .

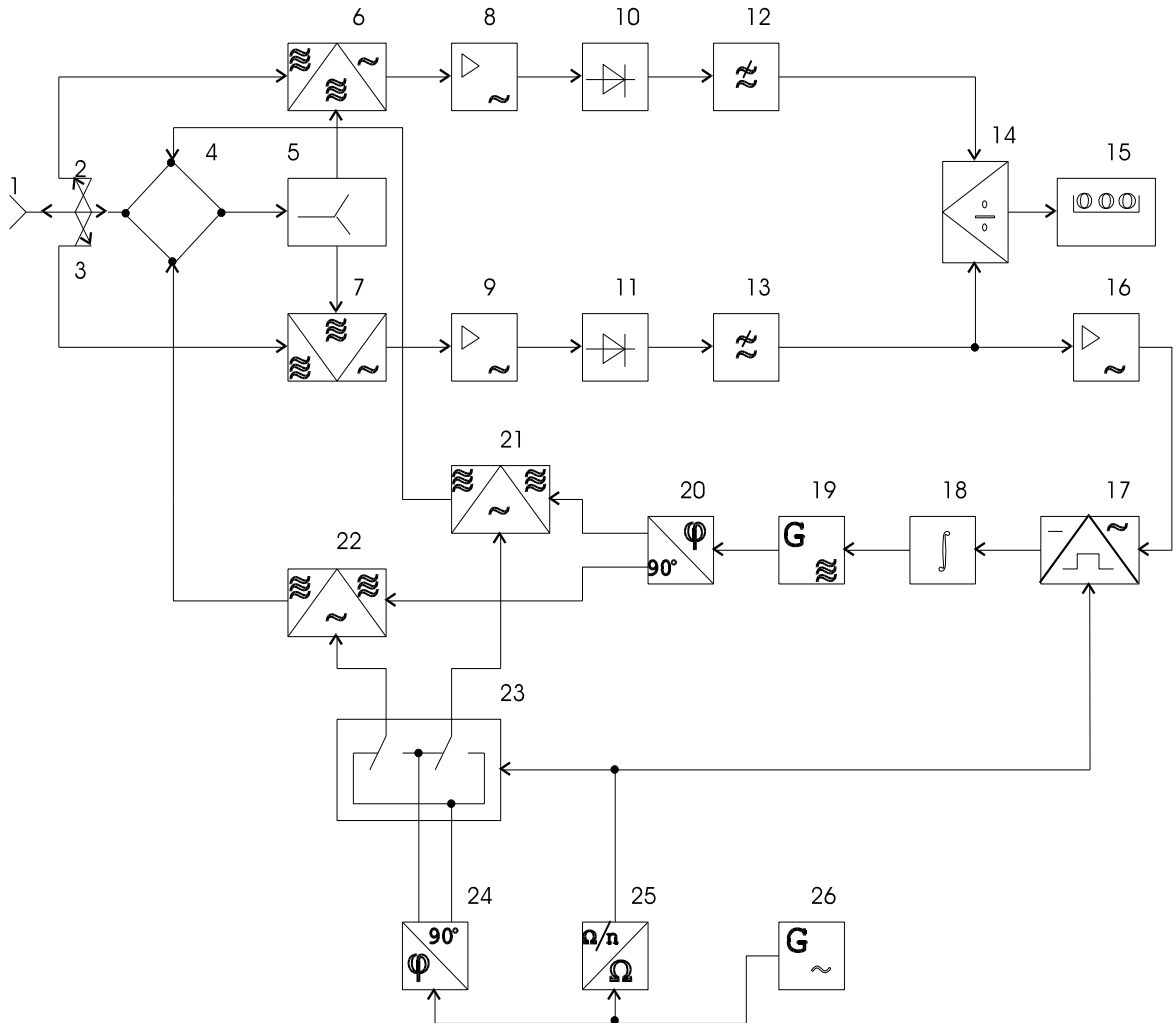


Рисунок 1 – Структурна схема вимірювача коефіцієнта відбиття

Внаслідок модуляції НВЧ коливань утворюються ортогональні тричастотні коливання вигляду:

$$U_5(t) = a_H \left\{ \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + 0,5m \cos[(\omega_1 - \Omega_1)t + \varphi_1 - \Phi_1] + 0,5m \cos[(\omega_1 - \Omega_1)t + \varphi_1 + \Phi_1] \right\}, \quad (5)$$

$$U_6(t) = a_H \{ \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + 0,5m \cos[(\omega_1 - \Omega_1)t + \varphi_1 - \Phi_1] - 0,5m \cos[(\omega_1 - \Omega_1)t + \varphi_1 + \Phi_1] \}, \quad (6)$$

де:  $a_H$  – амплітуда несучих коливань;  $m$  – коефіцієнт глибини амплітудної модуляції.

Коливання різницевої частоти  $\omega_2 = \omega_1 - \Omega_1$  з фазою  $\varphi_2 = \varphi_1 - \Phi_1$  є коливаннями нижньої бокової частоти відносно несучої частоти  $\omega_1$ , а коливання сумарної частоти  $\omega_3 = \omega_1 + \Omega_1$  з фазою  $\varphi_3 = \varphi_1 + \Phi_1$  – це коливання верхньої бокової частоти.

Тричастотні коливання (5) і (6) складаються та віднімаються в подвійному хвилеводному трійнику 4. Внаслідок цих операцій на виходах подвійного хвилеводного трійника формуються модульовані НВЧ коливання тільки з одною боковою частотою.

При складанні модульованих коливань утворюється НВЧ сигнал з нижньою боковою частотою

$$U'_7(t) = a'_H [\cos(\omega_1 t + \varphi_1 + \pi/4) + m \cos(\omega_2 t + \varphi_2)], \quad (7)$$

і в результаті віднімання – НВЧ сигнал з верхньою боковою частотою

$$U'_8(t) = a''_H [\cos(\omega_1 t + \varphi_1 - \pi/4) + m \cos(\omega_3 t + \varphi_2)], \quad (8)$$

де  $a'_H$  і  $a''_H$  – амплітуда несучих коливань модульованих сигналів.

Глибину модуляції НВЧ коливань обирають невеликою у межах 5...10% ( $m = 0,05...0,1$ ), щоб потужність НВЧ коливань була зосереджена в основному у несучих коливаннях частоти  $\omega_1$ , які впливають на неоднорідне середовище. Сумарні НВЧ коливання (7) з одного виходу подвійного хвилеводного трійника надходять до приймально-передаючої антени 1, а різницеві НВЧ коливання (8) з другого виходу подвійного хвилеводного трійника через дільник потужності 5 надходять на балансні НВЧ змішувачі 6 і 7. За допомогою направлених відгалужувачів 2 і 3 виділяються падаючі на неоднорідне середовище і відбиті від нього НВЧ коливання. Амплітуда відбитих коливань пропорційна коефіцієнту відбиття середовища, який в смузі поглинання істотно залежить від частоти опромінюючих коливань (рис. 2, а і б). Мінімальне значення коефіцієнта відбиття має місце при збігу частоти збуджуючих коливань  $\omega_i$  з частотою  $\omega_p$  релаксації молекул води вологого матеріалу ( $\omega_p = \omega_i$ ).

Модуль коефіцієнта відбиття в залежності від співвідношення частот  $\omega_p$  і  $\omega_i$  можна показати як

$$\Gamma_i = \sqrt{4\Gamma_p^2 + (1 - \Gamma_p)^2 \zeta_i^2} / \sqrt{4 + (1 + \Gamma_p)^2 \zeta_i^2}, \quad (9)$$

де  $\Gamma_p = \Gamma_{\min}$  – коефіцієнт відбиття при збігу частот  $\omega_p = \omega_i$ ;  $\zeta_i = 2Q\Delta\omega_i / \omega_p$  – узагальнена розстройка НВЧ сигналу відносно частоти релаксації  $\omega_p$ ;  $Q$  – еквівалентна добротність у смузі поглинання;  $\Delta\omega = \omega_i - \omega_p$  – розстройка на частотах  $\omega_i$  модульованих коливань.

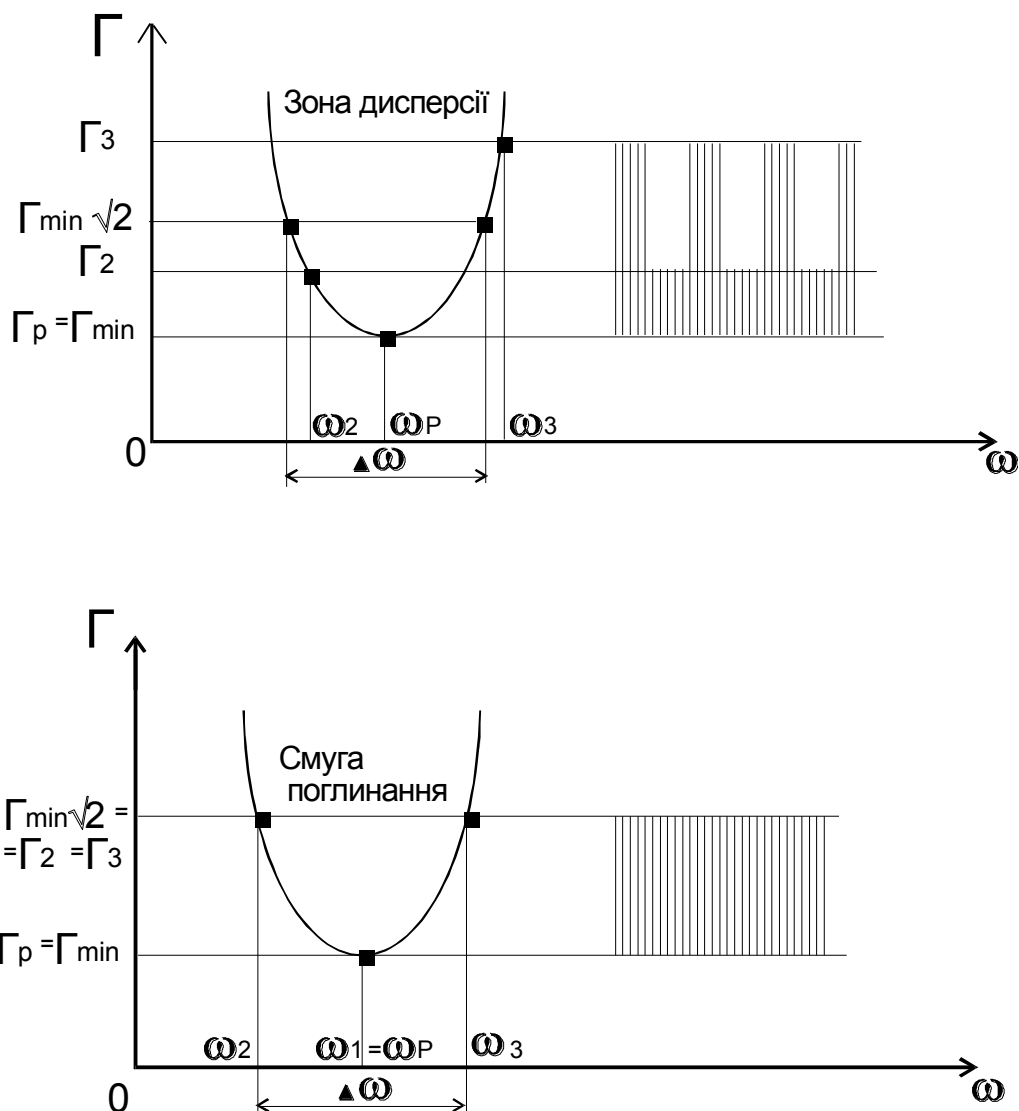


Рисунок 2 – Розподіл коефіцієнта відбиття в смузі поглинання

Відбиті від середовища сумарні НВЧ коливання (7) з урахуванням коефіцієнта відбиття набувають вигляду

$$U'_9(t) = a'_H [\Gamma_1 \cos\{\omega_1 t + \varphi_1 + \pi/4 + \Delta\varphi'_1\} + \Gamma_2 m \cos(\omega_2 t + \varphi_2 + \Delta\varphi_2)], \quad (10)$$

де  $\Gamma_1$  і  $\Gamma_2$  – модулі коефіцієнта відбиття неоднорідного середовища на частотах  $\omega_1$  і  $\omega_2$ ;  $\Delta\varphi'_1$  і  $\Delta\varphi_2$  – додаткові фазові зсуви коливань на відповідних частотах.

При змішуванні виділених направленим відгалужувачем 3 відбитих НВЧ коливань (10) з різницевиими НВЧ коливаннями (8) у баланському змішувачі 7 формуються низькочастотні коливання з різницевиими частотами  $\omega_3 - \omega_1 = \Omega_1$  і  $\omega_3 - \omega_2 = 2\Omega_1$ . З спектру цих коливань вибіркоким підсилювачем 9 виділяють коливання з подвоєною частотою модуляції

$$U'_{10}(t) = S_1 \Gamma_2 K_1 m^2 a'_H a''_H \cos(2\Omega_1 t + \Phi'_2), \quad (11)$$

де  $S_1$  – крутість балансного змішування;  $K_1$  – коефіцієнт вибіркового підсилення

ня;  $\Phi'_2$  – фаза низькочастотних коливань при опромінюванні середовища сумарними НВЧ коливаннями.

Аналогічним образом у балансному змішувачі 6 змішуються сумарні падаючі НВЧ коливання (7), виділені направленим відгалужувачем 2, з різницевиими НВЧ коливаннями (8). На виході вибіркового підсилювача 8 виділяються також низькочастотні коливання з подвоєною частотою модуляції

$$U_{11}(t) = S_1 K_1 m^2 a'_H a''_Y \cos(2\Omega t + \Phi'_3), \quad (12)$$

де  $\Phi'_3$  – фаза низькочастотних опорних коливань.

Низькочастотні коливання (11) і (12) детектуються амплітудними детекторами 10 і 11. Постійні складові сигналів виділяються фільтрами нижніх частот 12 і 13 і надходять на входи блоку ділення 14, де здійснюється операція ділення. На індикатор 15 надходить сигнал напруги, пропорційної частці від ділення означених напруг. З виразів (11) і (12) випливає, що частка від ділення амплітуд низькочастотних напруг пропорційна коефіцієнту відбиття опромінюемого середовища, тобто

$$U'_{12} = S_2 \Gamma_2(\omega_2), \quad (13)$$

де  $S_2$  – крутість результуючого перетворення коефіцієнта відбиття в напругу;  $\Gamma_2(\omega_2)$  – коефіцієнт відбиття середовища на частоті  $\omega_2$ .

Коефіцієнт відбиття на нижній боковій частоті  $\omega_2$  має вигляд

$$\Gamma_2(\omega_2) = \sqrt{4\Gamma_P^2 + (1 - \Gamma_P)^2 \zeta_2^2} / \sqrt{4 + (1 + \Gamma_P)^2 \zeta_2^2}, \quad (14)$$

де  $\zeta_2 = 2Q\Delta\omega_2 / \omega_P$  – узагальнена розстройка на нижній боковій частоті  $\omega_2$ ;  $\Delta\omega_2 = \omega_2 - \omega_P$  – розстройка відносно частоти релаксації неоднорідного середовища  $\omega_P$ .

При зміні положення контактів комутатора 23 відбувається взаємне заміщення низькочастотних модулюючих коливань  $U_3$  і  $U_4$ :

$$U_3'' = A \sin(\Omega t + \Phi_1), \quad (15)$$

$$U_4'' = A \cos(\Omega t + \Phi_1). \quad (16)$$

Внаслідок заміщення на виходах подвійного хвилеводного трійника 4 відбувається також заміщення сумарних НВЧ коливань різницевиими і навпаки:

$$U_7''(t) = a'_H [\cos(\omega_1 t + \varphi_1 - \pi/4) + m \cos(\omega_3 t + \varphi_3)], \quad (17)$$

$$U_8''(t) = a''_H [\cos(\omega_1 t + \varphi_1 + \pi/4) + m \cos(\omega_2 t + \varphi_2)]. \quad (18)$$

При цьому контрольоване середовище починає опромінюватись різницевиими модульованими НВЧ коливаннями, а на опорні входи балансних змішувачів 6 і 7 починають надходити сумарні модульовані НВЧ коливання з виходів діляника потужності 5. Відбиті від середовища різницеві НВЧ коливання (16) набувають вигляду

$$U_9''(t) = a''_H [\Gamma_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1 - \pi/4 + \Delta\varphi_1'') + \Gamma_3 m \cos(\omega_3 t + \varphi_3 + \Delta\varphi_3)], \quad (19)$$

де  $\Gamma_3$  – модуль коефіцієнта відбиття середовища на частоті  $\omega_3$ ;  $\varphi_1''$  і  $\Delta\varphi_3$  – додаткові фазові зсуви коливань на несучій і боковій частотах.

Коефіцієнт відбиття на частоті  $\omega_3$  має вигляд

$$\Gamma_3(\omega_3) = \sqrt{4\Gamma_P^2 + (1 - \Gamma_P)^2 \zeta_3^2} / \sqrt{4 + (1 + \Gamma_P)^2 \zeta_3^2}, \quad (20)$$

де  $\zeta_3 = 2Q\Delta\omega_3 / \omega_p$  – узагальнена розстройка на верхній боковій частоті  $\omega_3$ ;  $\Delta\omega_3 = \omega_3 - \omega_p$  – розстройка відносно частоти релаксації  $\omega_p$ .

Змішують відбиті від середовища модульовані НВЧ коливання (10) з сумарними НВЧ коливаннями (17). У вимірному каналі виділяють із змішаних коливань низькочастотний сигнал з подвоєною частотою модуляції, аналогічний (11).

$$U''_{10}(t) = S_1 \Gamma_3 K_1 m^2 a'_H a''_H \cos(2\Omega_1 t + \Phi_2''), \quad (21)$$

де  $\Phi_2''$  – фаза низькочастотних коливань при опромінюванні середовища різницею НВЧ коливаннями.

В опорному каналі на виході вибіркового підсилювача 8 виділяють аналогічні (12) опорні низькочастотні коливання

$$U''_{11}(t) = S_1 K_1 m^2 a'_H a''_Y \cos(2\Omega_1 t + \Phi_3''). \quad (22)$$

На виході блоку ділення 14 внаслідок ділення амплітуд сигналів (21) і (22) утворюється напруга

$$U''_{12} = S_2 \Gamma_3(\omega_3). \quad (23)$$

При періодичній роботі комутатора 23 з більш низькою частотою  $\Omega_2$  порівняно з частотою модуляції  $\Omega_1$  ( $\Omega_2 < \Omega_1$ ) на виході вибіркового підсилювача 9 почергово виділяються пакети низькочастотних сигналів  $U'_{10}(t)$  і  $U''_{10}(t)$ , амплітуди яких пропорційні коефіцієнтам відбиття  $\Gamma_2$  і  $\Gamma_3$ . При їх нерівності виникає огинаюча амплітуди низькочастотних сигналів, період повторення якої рівний періоду перемикавання комутатора 23. У результаті детектування цього сигналу на виході фільтру 13 нижніх частот поряд з постійною складовою утворюється змінна складова частоти комутації

$$U_{13}(t) = K_2 \frac{U'_{10} - U''_{10}}{2} \cos(\Omega_2 t + \Phi_4) = 0,5 S_1 K_1 K_2 m^2 a'_H a''_H (\Gamma_2 - \Gamma_3) \cos(\omega_2 t + \Phi_4), \quad (24)$$

де  $K_2$  – коефіцієнт перетворення низькочастотних коливань.

Напруга (24) частоти комутації посилюється підсилювачем 16 частоти комутації, спрямлюється синхронним детектором 17 і змінює частоту НВЧ генератора 19. Процес регулювання частоти генератора 19 здійснюється до отримання нульової напруги частоти комутації (24). При досягненні рівності коефіцієнтів відбиття на бокових частотах  $\omega_2$  і  $\omega_3$  (рис. 2, б) має місце рівність

$$\Gamma_2 = \Gamma_3 \text{ або } |\omega_2 - \omega_p| = |\omega_3 - \omega_p|. \quad (25)$$

Позаяк бокові частоти  $\omega_2$  і  $\omega_3$  модульованих НВЧ коливань змінюються синхронно із зміною несучої частоти  $\omega_l$ , рівність (25) задовольняється за умовою

$$|\omega_l - \Omega_1 - \omega_{p=1}| = |\omega_l + \Omega_1 - \omega_p|. \quad (26)$$

З останнього видно, що в цьому випадку несуча частота  $\omega_l$  модульованих коливань, на якій зосереджено більшу частину енергії опромінюючих НВЧ коливань, починає співпадати з частотою релаксації  $\omega_p$ .

$$\omega_1 = \omega_m = \frac{2\pi}{\tau_m}, \quad (27)$$

де  $\tau_p$  – час релаксації диполей води неоднорідного середовища.

При цьому на виході блоку ділення 14 утворюється сигнал постійного струму, пропорційний (рис. 2, б)

$$\begin{aligned} U''_{12} = U'_{12} = S_2 \Gamma_2(\omega_2) = S_2 \Gamma_3(\omega_3) = \\ = (S_2 / \sqrt{2}) \Gamma_{\min}(\omega_4) = S'_2 \Gamma_{\min}(\omega_p), \end{aligned} \quad (28)$$

де  $S'_2 = S_2 / \sqrt{2}$  – нормована крутість перетворення.

### **Висновки**

Таким чином, частота опромінюючих НВЧ коливань точно настроюється на частоту релаксації  $\omega_p$ , наприклад, частоту релаксації диполей молекул води вологого матеріалу, що відповідає максимуму поглинання електромагнітної енергії вологим матеріалом. Коефіцієнт відбиття приймає мінімальне значення, котре однозначно зв'язане з вологістю матеріалу. На співвідношення (26) не впливає неминуча нерівність амплітуд опромінюючих НВЧ коливань ( $a'_H \neq a''_H$ ), нестабільність і нерівність параметрів змішувачів, підсилювачів, детекторів, фільтрів і інших елементів вимірювального і опорного каналів. Це пояснюється тим, що зниження напруги частоти комутації має місце тільки при рівності коефіцієнтів відбиття ( $\Gamma_2 = \Gamma_3$ ) на бокових частотах ( $\omega_2$  і  $\omega_3$ ) незалежно від значень параметрів перетворювальних ланок і амплітуд почергово опромінюючих коливань.

Використання розглянутих способу і пристрою дозволяє, наприклад, в процесі сушіння матеріалів автоматично перестроювати частоту опромінюючих НВЧ коливань за максимумом поглинання, що значно прискорює процес сушіння. Об'єктивний контроль вологості за мінімальним коефіцієнтом відбиття дозволяє з високою точністю витримувати технологічний регламент сушіння і підвищити, завдяки цьому, якість волого-теплової обробки матеріалів.

Дослідження показали, що режим сушіння НВЧ коливаннями капілярно-пористих матеріалів (шкіра, тканини, папір тощо) у діапазоні частот 3...10 ГГц з настройкою на частоту релаксації дозволяє скоротити час сушіння у 1.5-2 рази, а похибку виміру вологості знизити до 0.2-0.5%. При цьому на 30-40% зменшуються витрати НВЧ енергії через поглинання відбитих від матеріалу НВЧ коливань конструктивними елементами апаратів для сушіння.

Перспективою подальшого розвитку є використання запропонованого технічного рішення для потреб практичної медицини і діагностики стану шкіри людського організму та оцінки життєздатності органів та фрагментів трансплантації.

### Література

1. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах. – Пер. с нем. / Под ред. В.Н. Сре-тенского. – М.: Издательство физико-математической литературы. – 1963. – С. 272-276.
2. Чернушенко А.М., Майбородин А.В. Измерение параметров электронных приборов де-циметрового и сантиметрового диапазона волн. – Под ред. А. М. Чернушенко. – М.: Ра-дио и связь. – 1986. – С. 191-196.
3. Абубакиров Б.А., Гудков К.Т., Нечаев Э.В. Измерение параметров радиотехнических це-пей. – Под ред. В.Г. Адрущенко, Б.П. Фатеева. – М.: Радио и связь. – 1984. – С. 129-133.
4. Патент № 44328 (Україна). Спосіб вимірювання коефіцієнта відбиття в смузї поглинання і пристрій для його здійснення / Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Іващенко В.О. – Бюл. № 2 . Опубл.15.02.2004.
5. Скрипник Ю. А., Яненко А. Ф., Манойлов В. Ф. и др. Микроволновая радиометрия фи-зических и биологических объектов. – Житомир: Волянь. – 2003. – 406 с.

Скрипник Ю.А., Шевченко К.Л., Іващенко В.А., Яненко А.Ф. <b>Автоматизований вимірник коефіцієнта відбиття в полосе поглинання.</b> В статті розглянуто спосіб і пристрій для вимірювання коефіцієнта відбиття, забезпечуючих підвищення точності в широкій полосі частот СВЧ-діапазона.	Skripnik Yu.A., Shevchenko K.L., Ivaschenko V.A., Yanenko A.F. <b>Automatic measurer of reflection coefficient within the band of absorption frequencies.</b> <i>The method and device for measurement of reflection coefficient ensuring the accuracy improvement within wide band of UHF-frequency range are considered in the paper.</i>
--	--

Надійшло до редакції  
10 квітня 2004 року

УДК 621.397.3

## ПІДВИЩЕННЯ ВІЗУАЛЬНОЇ ІНФОРМАТИВНОСТІ ТЕРМОГРАМ ПРИ ОНКОЛОГІЧНИХ ЗАХВОРЮВАННЯХ МОЛОЧНИХ ЗАЛОЗ

<sup>1)</sup>Бехтір О.В., <sup>1)</sup>Сизов Ф.Ф., <sup>2)</sup>Чешук В.Є., <sup>2)</sup>Носко М.М., <sup>2)</sup>Олійниченко Г.П.

<sup>1)</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, м.Київ, Україна;

<sup>2)</sup>Київська міська онкологічна лікарня (кафедра онкології Національного медичного уні-верситету ім. О.О. Богомольця), м.Київ, Україна

*Розглянуто особливості інтерпретації термограм молочних залоз. З урахуванням зако-нів зорового сприйняття інформації, з метою покращення інформативності візуалізації термограм запропоновано алгоритм обробки теплових зображень. Наведено приклади об-робки та дослідження термограм обстежених онкологічних хворих*

### Вступ

На сьогодні рак молочної залози (РМЗ) займає перше місце в структурі он-кологічної захворюваності жінок, причому показники захворюваності за остан-ні 20 років збільшилися на 40%. Слід зазначити, що в першій стадії РМЗ діаг-ностується лише в 30% випадків, а кількість помилок на поліклінічному етапі сягає 38% [1].