

УДК 621.317.3

## АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ ФАЗОВОГО КУТА КОЕФІЦІЄНТА ПЕРЕДАЧІ ХВИЛЕВОДНОЇ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ КОМІРКИ У ВИПАДКУ СЛАБКОПОГЛИНАЮЧОГО ДІЕЛЕКТРИКА

Р. В. ПЕТРОСЯН, В. В. ЧУХОВ

Житомирський державний технологічний університет

К.Л. ШЕВЧЕНКО

Київський національний університет технологій та дизайну

*У роботі проаналізовано чутливість фазового кута коефіцієнта передачі хвильоводної вимірювальної комірки до зміни таких величин, як товщина шару діелектрика, його діелектрична проникність та довжина хвилі. Дано рекомендації щодо вибору оптимальних частот для вимірювань.*

Дієвим способом покращення характеристик пристроїв НВЧ є застосування діелектричних матеріалів [1–4]. Для типової хвильоводної вимірювальної комірки, що є відрізком прямокутного хвильоводу з плоскошаровим діелектриком, який заповнено діелектриком без втрат чи слабкопоглинаючим діелектриком, частотна залежність коефіцієнта відбиття періодична [5]. В рамках задачі вимірювання параметрів такої комірки з точки зору точності вимірювань важливо проаналізувати чутливість такої комірки до впливних величин. Аналіз чутливості модуля та аргументу коефіцієнта відбиття для діелектрика без втрат здійснено в [5], а для модулів коефіцієнтів відбиття та передачі у випадку слабкопоглинаючого діелектрика – в [6]. Проте при вимірюваннях всієї матриці розсіяння такої комірки, заповненої слабкопоглинаючим діелектриком, залишається відкритим питання про чутливість фазових кутів елементів цієї матриці, зокрема це стосується вимірювання коефіцієнта передачі, наприклад, за допомогою установки, описаної в [7].

### *Постановка завдання*

Потрібно проаналізувати чутливість фазового кута коефіцієнта передачі до зміни таких величин, як довжина зразка  $l$ , довжина хвилі  $\lambda$ , діелектрична проникність зразка.

### *Результати та їх обговорення*

В основу аналізу покладемо коефіцієнти чутливості [5, 6]. З урахуванням рекомендацій [6], чутливість фазового кута коефіцієнта передачі  $\arg \dot{T}$  хвильоводної вимірювальної комірки до довжини зразка  $l$

$$S_l^{\arg \dot{T}} = l \frac{\partial \arg \dot{T}}{\partial l} = l \operatorname{Im} \left( \frac{1}{\dot{T}} \frac{\partial \dot{T}}{\partial l} \right), \quad (1)$$

по довжині хвилі:

$$S_\lambda^{\arg \dot{T}} = \lambda \operatorname{Im} \left( \frac{1}{\dot{T}} \frac{\partial \dot{T}}{\partial \lambda} \right), \quad (2)$$

та по дійсній  $\varepsilon'$  та уявній  $\varepsilon''$  частинам комплексної діелектричної проникності  $\varepsilon$ :

$$S_{\varepsilon'}^{\arg \dot{T}} = \varepsilon' \operatorname{Im} \left( \frac{1}{\dot{T}} \frac{\partial \dot{T}}{\partial \varepsilon'} \right), \quad (3)$$

$$S_{\varepsilon''}^{\arg \dot{T}} = \varepsilon'' \operatorname{Im} \left( \frac{1}{\dot{T}} \frac{\partial \dot{T}}{\partial \varepsilon''} \right). \quad (4)$$

де  $\frac{1}{\dot{T}} \frac{\partial \dot{T}}{\partial l} = \frac{-(i\beta_1 + \alpha_1)(1 + \dot{\rho}^2 \dot{F}^2)}{1 - \dot{\rho}^2 \dot{F}^2}$ ,  $\dot{F} = e^{-i\theta} = e^{-i\gamma_1 l}$  – функція послаблення;  $\dot{\rho} = (W_1 - W_0)/(W_1 + W_0)$  –

коефіцієнт відбиття стрибка хвильового опору;  $W_1, W_0$  – хвильові опори хвильоводу з діелектриком та без діелектрика відповідно;  $\gamma_1 = \beta_1 - i\alpha_1$  – стала поширення у хвильоводі з діелектриком (в статті розглядається випадок для хвилі  $H_{10}$  прямокутного металеводу);  $l_1 \equiv l$  – довжина хвильоводної вимірювальної комірки.

Інші символи, які входять до складу формул (1)-(4), мають такий вигляд:

$$\frac{1}{\dot{T}} \frac{\partial \dot{T}}{\partial \lambda} = \frac{l(1 - \dot{\rho}^2) [1 - \dot{\rho}^2 \dot{F}^2 (1 - 2\dot{F})] + 2\dot{\rho} [1 - \dot{F}^3 - \dot{\rho}^2 \dot{F}^2 (1 - \dot{F})] (e^{i\varphi} \rho'_\lambda + \dot{\rho} \varphi'_\lambda)}{(1 - \dot{\rho}^2 \dot{F}^2)(\dot{\rho}^2 - 1)},$$

$$\rho'_\lambda = \frac{1}{2\sqrt{x/y}} \cdot \frac{x'_\lambda y - x y'_\lambda}{y^2};$$

$$\varphi'_\lambda = \frac{2 \left\{ (\beta_0^2 - \beta_1^2) [(\beta_0)_\lambda' \alpha_1 + \beta_0 (\alpha_1)_\lambda'] - 2\beta_0 \alpha_1 [\beta_0 (\beta_0)_\lambda' - \beta_1 (\beta_1)_\lambda'] \right\}}{(\beta_0^2 - \beta_1^2)^2 + 4\beta_0^2 \alpha_1^2};$$

$$x = (\beta_0 - \beta_1)^2 + \alpha_1^2; \quad y = (\beta_0 + \beta_1)^2 + \alpha_1^2; \quad \alpha_1 = \alpha_d + \alpha_m;$$

$$x'_\lambda = 2 \left\{ (\beta_0 - \beta_1) [(\beta_0)_\lambda' - (\beta_1)_\lambda'] + \alpha_1 (\alpha_1)_\lambda' \right\};$$

$$y'_\lambda = 2 \left\{ (\beta_0 + \beta_1) [(\beta_0)_\lambda' + (\beta_1)_\lambda'] + \alpha_1 (\alpha_1)_\lambda' \right\};$$

$$(\beta_0)_\lambda' = \frac{-k \left( m_0^2 + \left( \frac{\lambda}{\lambda_{cr}} \right)^2 \right)}{m_0 \lambda}; \quad (\alpha_1)_\lambda' = (\alpha_d)_\lambda' + (\alpha_m)_\lambda';$$

$$\begin{aligned}
 (\beta_1)'_{\lambda} &= -\frac{k}{\sqrt{2}} \left[ \frac{1}{\lambda} \sqrt{\sqrt{\xi} + \varepsilon' - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2} + \frac{\lambda}{\lambda_{cr}^2 \sqrt{\sqrt{\xi} + \varepsilon' - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2}} \left( \frac{\varepsilon' - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2}{\sqrt{\xi}} + 1 \right) - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{60\sigma_m \varepsilon''}{2\sqrt{\xi} \sqrt{\sqrt{\xi} + \varepsilon' - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2}} \right]; \\
 (\alpha_d)'_{\lambda} &= -\frac{k}{\sqrt{2}} \left[ \frac{1}{\lambda} \sqrt{\sqrt{\xi} - \varepsilon' + \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2} + \frac{\lambda}{\lambda_{cr}^2 \sqrt{\sqrt{\xi} - \varepsilon' + \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2}} \left( \frac{\varepsilon' - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2}{\sqrt{\xi}} - 1 \right) - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{60\sigma_m \varepsilon''}{2\sqrt{\xi} \sqrt{\sqrt{\xi} - \varepsilon' + \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2}} \right]; \\
 (\alpha_m)'_{\lambda} &= \frac{m_0 \left\{ \left[ 1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 \right] (R_s)'_{\lambda} + \frac{b\lambda}{a^3} R_s \right\} - \left[ 1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 \right] R_s (m_0)'_{\lambda}}{Wbm_0^2}; \\
 \zeta &= \left[ \varepsilon' - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2 \right]^2 + (\varepsilon'')^2; \quad (R_s)'_{\lambda} = -\frac{\pi \sqrt{c\lambda\sigma_m} \cdot 10^{-7}}{\lambda^2 \sigma_m}; \\
 m_0 &= \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}; \quad (m_0)'_{\lambda} = \frac{-\lambda}{m_0(2a)^2}; \\
 \frac{1}{\dot{T}} \frac{\partial \dot{T}}{\partial \varepsilon'} &= \frac{\dot{c}'_{\varepsilon} \dot{b} - \dot{c} \dot{b}'_{\varepsilon}}{(1 - \dot{\rho}^2)(1 - \dot{\rho}^2 \dot{F}^2)}; \quad \frac{1}{\dot{T}} \frac{\partial \dot{T}}{\partial \varepsilon''} = \frac{\dot{c}'_{\varepsilon} \dot{b} - \dot{c} \dot{b}'_{\varepsilon}}{(1 - \dot{\rho}^2)(1 - \dot{\rho}^2 \dot{F}^2)}; \\
 \dot{c}'_{\varepsilon} \dot{b} &= -\left\{ l \left[ i(\beta_1)'_{\varepsilon'} + (\alpha_1)'_{\varepsilon'} \right] (1 - \dot{\rho}^2) + 2\dot{\rho} (e^{i\varphi} \rho'_{\varepsilon'} + i\dot{\rho} \phi'_{\varepsilon'}) \right\} (1 - \dot{\rho}^2 \dot{F}^2); \\
 \dot{c}'_{\varepsilon} \dot{b} &= -\left\{ l \left[ i(\beta_1)'_{\varepsilon''} + (\alpha_1)'_{\varepsilon''} \right] (1 - \dot{\rho}^2) + 2\dot{\rho} (e^{i\varphi} \rho'_{\varepsilon''} + i\dot{\rho} \phi'_{\varepsilon''}) \right\} (1 - \dot{\rho}^2 \dot{F}^2); \\
 \dot{c} \dot{b}'_{\varepsilon} &= 2(1 - \dot{\rho}^2) \left[ l \rho^2 (\alpha_1)'_{\varepsilon'} - \rho \dot{\rho}'_{\varepsilon'} - i \rho^2 (\phi'_{\varepsilon'} - l(\beta_1)'_{\varepsilon'}) \right] \dot{F}^2 e^{i2\varphi}; \\
 \dot{c} \dot{b}'_{\varepsilon} &= 2(1 - \dot{\rho}^2) \left[ l \rho^2 (\alpha_1)'_{\varepsilon''} - \rho \dot{\rho}'_{\varepsilon''} - i \rho^2 (\phi'_{\varepsilon''} - l(\beta_1)'_{\varepsilon''}) \right] \dot{F}^2 e^{i2\varphi};
 \end{aligned}$$

$$\varphi'_{\varepsilon'} = \frac{2 \left[ \beta_0 (\beta_0^2 - \beta_1^2) (\alpha_1)'_{\varepsilon'} + 2 \beta_0 \beta_1 \alpha_1 (\beta_1)'_{\varepsilon'} \right]}{(\beta_0^2 - \beta_1^2)^2 + 4 \beta_0^2 \alpha_1^2};$$

$$\varphi'_{\varepsilon''} = \frac{2 \left[ \beta_0 (\beta_0^2 - \beta_1^2) (\alpha_1)'_{\varepsilon''} + 2 \beta_0 \beta_1 \alpha_1 (\beta_1)'_{\varepsilon''} \right]}{(\beta_0^2 - \beta_1^2)^2 + 4 \beta_0^2 \alpha_1^2};$$

$$\rho'_{\varepsilon'} = \frac{1}{2 \sqrt{x/y}} \cdot \frac{x'_{\varepsilon'} y - x y'_{\varepsilon'}}{y^2}; \quad \rho'_{\varepsilon''} = \frac{1}{2 \sqrt{x/y}} \cdot \frac{x'_{\varepsilon''} y - x y'_{\varepsilon''}}{y^2},$$

$$x'_{\varepsilon'} = 2 \left[ (\beta_1 - \beta_0) (\beta_1)'_{\varepsilon'} + \alpha_1 (\alpha_1)'_{\varepsilon'} \right]; \quad x'_{\varepsilon''} = 2 \left[ (\beta_1 - \beta_0) (\beta_1)'_{\varepsilon''} + \alpha_1 (\alpha_1)'_{\varepsilon''} \right];$$

$$y'_{\varepsilon'} = 2 \left[ (\beta_1 + \beta_0) (\beta_1)'_{\varepsilon'} + \alpha_1 (\alpha_1)'_{\varepsilon'} \right]; \quad y'_{\varepsilon''} = 2 \left[ (\beta_1 + \beta_0) (\beta_1)'_{\varepsilon''} + \alpha_1 (\alpha_1)'_{\varepsilon''} \right];$$

$$(\beta_1)'_{\varepsilon'} = \frac{k}{2 \sqrt{2} \sqrt{\sqrt{\xi} + \varepsilon' - \left( \frac{\lambda}{\lambda_{cr}} \right)^2}} \left( \frac{\varepsilon' - \left( \frac{\lambda}{\lambda_{cr}} \right)^2}{\sqrt{\xi}} + 1 \right);$$

$$(\beta_1)'_{\varepsilon''} = \frac{k \varepsilon''}{2 \sqrt{2} \sqrt{\xi} \sqrt{\sqrt{\xi} + \varepsilon' - \left( \frac{\lambda}{\lambda_{cr}} \right)^2}}; \quad (\alpha_1)'_{\varepsilon'} = (\alpha_0)'_{\varepsilon'} + (\alpha_m)'_{\varepsilon'}; \quad (\alpha_1)'_{\varepsilon''} = (\alpha_0)'_{\varepsilon''};$$

$$(\alpha_0)'_{\varepsilon'} = \frac{k}{2 \sqrt{2} \sqrt{\sqrt{\xi} - \varepsilon' + \left( \frac{\lambda}{\lambda_{cr}} \right)^2}} \left( \frac{\varepsilon' - \left( \frac{\lambda}{\lambda_{cr}} \right)^2}{\sqrt{\xi}} - 1 \right); \quad (\alpha_0)'_{\varepsilon''} = \frac{k \varepsilon''}{2 \sqrt{2} \sqrt{\xi} \sqrt{\sqrt{\xi} - \varepsilon' + \left( \frac{\lambda}{\lambda_{cr}} \right)^2}};$$

$$(\alpha_m)'_{\varepsilon'} = - \frac{R_s \sqrt{\varepsilon'} \left( 1 + \frac{2b}{a} \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right)}{2W_0 b m_0}.$$

Тут  $\alpha_0$  – втрати в діелектрику;  $\alpha_m$  – втрати в стінках хвильоводу;  $\lambda_{cr}$  – критична довжина хвилі;  
 $W \cong 120 \pi / \sqrt{\varepsilon'}$ ;  $a, b$  – поперечні розміри хвильоводу;  $\sigma_m$  – провідність стінок хвильоводу;  $k$  – хвильове число вакууму.

На рис. 1 наведено типові частотні залежності коефіцієнтів  $S_l^{\text{arg}T}$ ,  $S_\lambda^{\text{arg}T}$ ,  $S_{\varepsilon'}^{\text{arg}T}$ , та  $S_{\varepsilon''}^{\text{arg}T}$ , побудовані за виразами (1)-(4) відповідно. Для спільності аналізу параметри зразка взято ті ж самі, що і в [6].

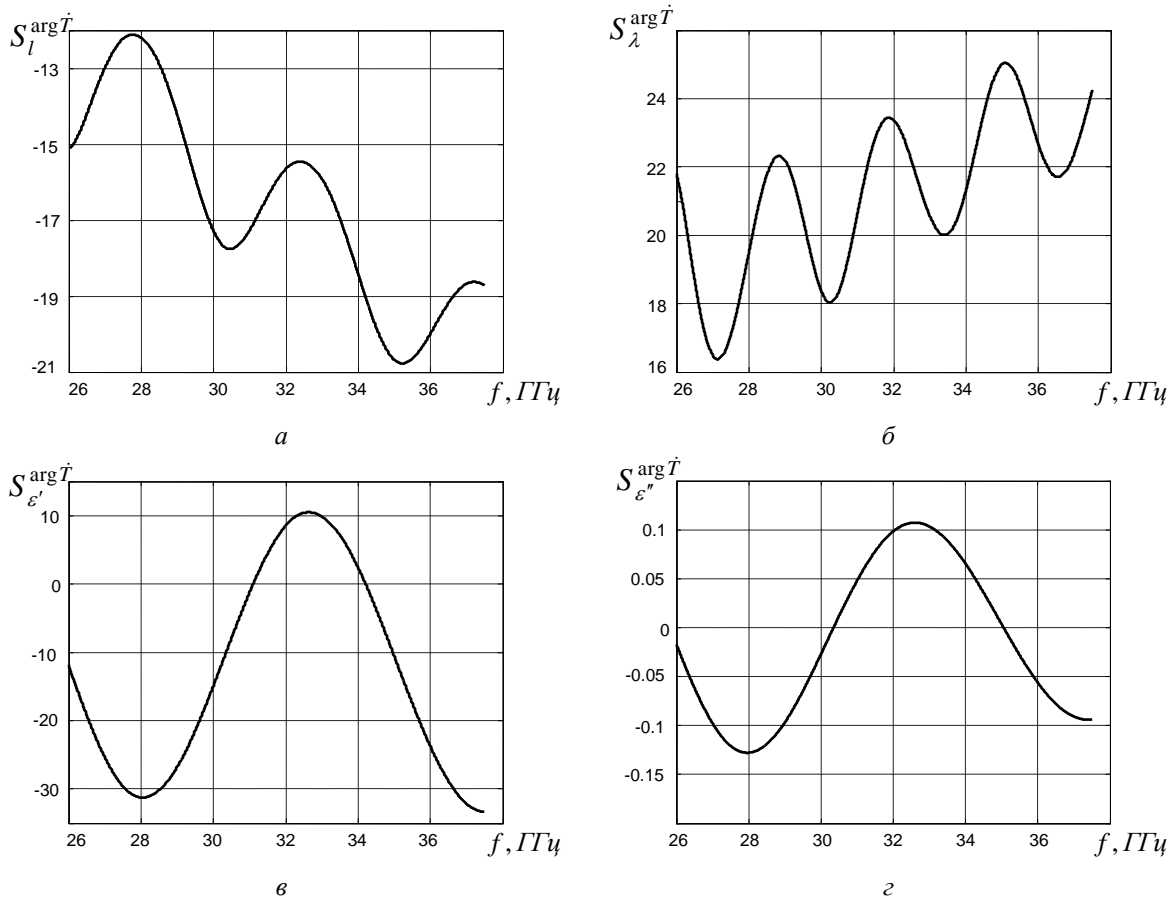


Рис. 1. Частотні залежності коефіцієнтів  $S_l^{\text{arg}T}$  (а),  $S_\lambda^{\text{arg}T}$  (б),  $S_{\varepsilon'}^{\text{arg}T}$  (в),  $S_{\varepsilon''}^{\text{arg}T}$  (г) при  $l = 20$  мм,  $\dot{\varepsilon} = 2(1 - i0,0064)$

Аналіз цих частотних залежностей дозволяє зробити такі висновки:

- всі чотири залежності мають осцилюючий характер;
- при збільшенні частоти значення коефіцієнтів  $S_l^{\text{arg}T}$ ,  $S_{\varepsilon'}^{\text{arg}T}$  та  $S_{\varepsilon''}^{\text{arg}T}$  зменшуються, причому значення  $S_{\varepsilon''}^{\text{arg}T}$  досить повільно, його обвідна пропорційна залежності  $\rho(f)$ , значення  $S_\lambda^{\text{arg}T}$ , навпаки, збільшуються;
- резонансні та антирезонансні частоти пов'язані з частотами екстремумів цих залежностей таким чином, що для коефіцієнта  $S_l^{\text{arg}T}$  максимуми – на антирезонансних, мінімуми – на резонансних частотах; для коефіцієнта  $S_\lambda^{\text{arg}T}$  екстремуми на резонансних частотах (максимуми при нульових значеннях фазового кута коефіцієнта передачі  $\varphi_T$ , мінімуми – при  $\varphi_T = \mp\pi$ ), антирезонансні частоти –

поза точками екстремумів; для коефіцієнтів  $S_{\varepsilon'}^{\text{arg}T}$ ,  $S_{\varepsilon''}^{\text{arg}T}$  екстремуми на антирезонансних частотах (максимуми при  $\varphi_T = \pi/2$ , мінімуми – при  $\varphi_T = -\pi/2$ ), резонансні частоти – поза точками екстремумів;

– з цих чотирьох коефіцієнтів через нуль проходить лише залежність для  $S_{\varepsilon''}^{\text{arg}T}$  на резонансних частотах;

– діапазон значень  $S_{\varepsilon''}^{\text{arg}T}$  набагато менший (приблизно на порядок) за діапазони значень інших трьох коефіцієнтів.

Трансформація їхніх частотних залежностей при збільшенні  $l$  (при цьому  $\varepsilon' = \text{const}$ ) має такий вигляд: коефіцієнт  $S_l^{\text{arg}T}$  – залежність зміщується в сторону менших значень по вісі ординат, при цьому розмах між точками її екстремумів збільшується; коефіцієнт  $S_\lambda^{\text{arg}T}$  – розмах між точками її екстремумів збільшується, абсолютні рівні максимумів при  $\varphi_T = 0$  більші по рівню за інші максимуми, а мінімуми при  $\varphi_T = 0$  менші по рівню за інші мінімуми; коефіцієнт  $S_{\varepsilon'}^{\text{arg}T}$  – залежність зміщується в сторону менших значень, діапазон значень практично не змінюється; коефіцієнт  $S_{\varepsilon''}^{\text{arg}T}$  – діапазон значень збільшується, характер обвідної залишається незмінним.

При збільшенні  $\varepsilon'$ : діапазони значень всіх чотирьох коефіцієнтів збільшуються; стрімкість залежності коефіцієнта  $S_l^{\text{arg}T}$  поблизу резонансних частот збільшується; абсолютні рівні екстремумів залежності коефіцієнта  $S_\lambda^{\text{arg}T}$  при  $\varphi_T = 0$  збільшуються, а при  $\varphi_T = \mp\pi$  зменшуються; залежності для коефіцієнтів  $S_{\varepsilon'}^{\text{arg}T}$  та  $S_{\varepsilon''}^{\text{arg}T}$  продовжують осцилювати навколо нульових значень, а їхня обвідна стає схожою на залежність  $\rho(f)$ .

Вплив збільшення  $\varepsilon''$  має такий вигляд: діапазони значень коефіцієнтів  $S_l^{\text{arg}T}$ ,  $S_\lambda^{\text{arg}T}$  зменшуються, залежності для коефіцієнтів  $S_{\varepsilon'}^{\text{arg}T}$ ,  $S_{\varepsilon''}^{\text{arg}T}$  продовжують осцилювати в околі нульових значень, при цьому діапазони їхніх значень збільшуються.

### Висновки

Проведений аналіз чутливості фазового кута коефіцієнта передачі дозволяє зробити такі висновки: частотні залежності для коефіцієнтів  $S_i^{\text{arg}T}$  ( $i = l; \lambda; \varepsilon'; \varepsilon''$ ) мають осцилюючий характер, без строгої прив'язки „екстремум – резонансна (антирезонансна) частота”, при збільшенні частоти відсутнє однозначне збільшення значень коефіцієнтів  $S_i^{\text{arg}T}$ . При збільшенні  $l$  та  $\varepsilon'$  має місце збільшення діапазонів значень всіх коефіцієнтів, а збільшення  $\varepsilon''$  спричиняє зворотній ефект (за винятком  $S_{\varepsilon'}^{\text{arg}T}$ ,  $S_{\varepsilon''}^{\text{arg}T}$ ).

Для модуля коефіцієнта передачі на резонансних частотах коефіцієнти чутливості мають значення, близькі до нуля. Тобто доцільніше проводити вимірювання на резонансних частотах. При цьому вимірювання „на прохід” призведе до менших похибок, порівняно з вимірюваннями характеристик відбитої хвилі. Крім цього, точність вимірювань буде більшою при довгих зразках, ніж при коротких, причому довжина зразків обмежуватиметься, в першу чергу, чутливістю вимірювальних приладів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Касименко В.Б., Копусов В.Н., Гордеев А.Н. Разработка сверхширокополосной измерительной антенны с диапазоном рабочих частот 12,05–37,50 ГГц // Материалы 20-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» – Севастополь: Вебер. – 2010. – С. 955–956.
2. Прокопенко Ю.В., Суворова О.А., Филиппов Ю.Ф., Шипилова И.А. Собственные колебания радиально трехслойных диэлектрических резонаторов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2009. – Т. 52, № 1. – С. 14–26.
3. Секретарёв С.С., Ваврив Д.М. Проблемы разработки широкополосных волноводно-щелевых антенн//Материалы 19-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер. – 2009. – С. 435–436.
4. Следков В.А., Обрезанова Л.А., Мануилов М.Б. Широкополосные многоканальные делители мощности на полосковых линиях для диапазона 2-18 ГГц // Материалы 17-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер. – 2007. – С. 444-445.
5. Чухов В. В. Аналіз чутливості хвилеводної комірки у випадку діелектрика без втрат // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. – 2004. – №4 (31). – С. 75-84.
6. Манойлов В.Ф., Чухов В.В. Анализ чувствительности модулей  $S$ -параметров волноводной измерительной ячейки в случае слабопоглощающего диэлектрика // Материалы 15-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер. – 2005. – С. 743 –744.
7. Саламатин В.В., Лемешко Г.В., Лукьянчук Г.А., Мельниченко Ю.А., Османов М.Р. Микроволновый измеритель комплексной диэлектрической проницаемости материала // Материалы 17-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь: Вебер. – 2007. – С. 710–711.

Надійшла 11.01.2011