

**АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ ФАЗОВОГО КУТА КОЕФІЦІЄНТА  
ВІДБИТТЯ ХВИЛЕВОДНОЇ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ КОМІРКИ  
У ВИПАДКУ СЛАБКОПОГЛИНАЮЧОГО ДІЕЛЕКТРИКА**

*Семенов А. О.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент,  
Семенова О. О.<sup>1</sup>, к.т.н., старший викладач  
Чухов В. В.<sup>2</sup>, к.т.н., доцент*

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

<sup>2</sup>Житомирський державний технологічний університет,  
м. Житомир, Україна

**Вступ.**

Одним з дієвих способів покращення характеристик пристроїв НВЧ є застосування діелектричних матеріалів [1-4]. Для типової хвилеводної вимірювальної комірки, що є відрізком прямокутного хвилеводу 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, в першу чергу це стосується вимірювання коефіцієнта відбиття, наприклад, за допомогою установок, описаних в [7, 8].

**Постановка задачі.**

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

**Теоретичні викладки.**

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

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

по довжині хвилі:

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

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

$$S_{\varepsilon'}^{\text{arg } \dot{R}} = \varepsilon' \operatorname{Im} \left( \frac{1}{\dot{R}} \frac{\partial \dot{R}}{\partial \varepsilon'} \right), \quad (3)$$

$$S_{\varepsilon''}^{\text{arg } \dot{R}} = \varepsilon'' \operatorname{Im} \left( \frac{1}{\dot{R}} \frac{\partial \dot{R}}{\partial \varepsilon''} \right). \quad (4)$$

У формули (1)  $\frac{1}{\dot{R}} \frac{\partial \dot{R}}{\partial l} = \frac{2\dot{F}^2(i\beta_1 + \alpha_1)(1 - \dot{\rho}^2)}{(1 - \dot{F}^2)(1 - \dot{\rho}^2\dot{F}^2)}$ , де  $\dot{F} = e^{-i\theta} = e^{-i\gamma_1 l_1}$  – 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 металевого хвильоводу);  $l_1 \equiv l$  – довжина хвильоводної вимірювальної комірки.

Символи, які входять до складу формули (2) виглядають так:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\dot{R}} \frac{\partial \dot{R}}{\partial \lambda} &= \frac{\dot{a}'_{\lambda} \dot{b}' - \dot{a} \dot{b}'_{\lambda}}{\dot{\rho}(1 - \dot{F}^2)(1 - \dot{\rho}^2 \dot{F}^2)}; \\ \dot{a}'_{\lambda} \dot{b}' &= e^{i\varphi} \{ (\rho'_{\lambda} + i\rho\varphi'_{\lambda})(1 - \dot{F}^2) + 2\rho l \dot{F}^2 [i(\beta_1)_{\lambda}' + (\alpha_1)_{\lambda}'] \} (1 - \dot{\rho}^2 \dot{F}^2); \\ \dot{a} \dot{b}'_{\lambda} &= 2\dot{\rho}(1 - \dot{F}^2) \left[ \rho^2 l (\alpha_1)_{\lambda}' - \rho\rho'_{\lambda} - i\rho^2 (\varphi'_{\lambda} - l(\beta_1)_{\lambda}') \right] e^{i2\varphi} \dot{F}^2; \\ \varphi'_{\lambda} &= \frac{2 \left\{ (\beta_0^2 - \beta_1^2) [(\beta_0)_{\lambda}' \alpha_1 + \beta_0 (\alpha_1)_{\lambda}'] - 2\beta_0 \alpha_1 [\beta_0 (\beta_0)_{\lambda}' - \beta_1 (\beta_1)_{\lambda}'] \right\}}{(\beta_0^2 - \beta_1^2)^2 + 4\beta_0^2 \alpha_1^2}; \\ \rho'_{\lambda} &= \frac{1}{2\sqrt{x/y}} \cdot \frac{x'_{\lambda} y - x y'_{\lambda}}{y^2}; \\ x &= (\beta_0 - \beta_1)^2 + \alpha_1^2; \quad y = (\beta_0 + \beta_1)^2 + \alpha_1^2; \quad \alpha_1 = \alpha_o + \alpha_m; \\ x'_{\lambda} &= 2 \left\{ (\beta_0 - \beta_1) [(\beta_0)_{\lambda}' - (\beta_1)_{\lambda}'] + \alpha_1 (\alpha_1)_{\lambda}' \right\}; \\ y'_{\lambda} &= 2 \left\{ (\beta_0 + \beta_1) [(\beta_0)_{\lambda}' + (\beta_1)_{\lambda}'] + \alpha_1 (\alpha_1)_{\lambda}' \right\}; \end{aligned}$$

$$(\beta_1)'_{\lambda} = -\frac{k}{\sqrt{2}} \left[ \frac{1}{\lambda} \sqrt{\sqrt{\xi} + \varepsilon' - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2} + \frac{\lambda}{\lambda_{cr}^2 \sqrt{\sqrt{\xi} + \varepsilon' - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2}} \left( \frac{\varepsilon' - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2}{\sqrt{\xi}} + 1 \right) - \frac{60\sigma_m \varepsilon''}{2\sqrt{\xi} \sqrt{\sqrt{\xi} + \varepsilon' - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2}} \right];$$

$$(\alpha_1)'_{\lambda} = (\alpha_{\partial})'_{\lambda} + (\alpha_m)'_{\lambda}$$

$$(\alpha_{\partial})'_{\lambda} = -\frac{k}{\sqrt{2}} \left[ \frac{1}{\lambda} \sqrt{\sqrt{\xi} - \varepsilon' + \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2} + \frac{\lambda}{\lambda_{cr}^2 \sqrt{\sqrt{\xi} - \varepsilon' + \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2}} \left( \frac{\varepsilon' - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2}{\sqrt{\xi}} - 1 \right) - \frac{60\sigma_m \varepsilon''}{2\sqrt{\xi} \sqrt{\sqrt{\xi} - \varepsilon' + \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2}} \right];$$

$$(\alpha_m)'_{\lambda} = \frac{m_0 \left\{ \left[ 1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 \right] (R_s)'_{\lambda} + \frac{b\lambda}{a^3} R_s \right\} - \left[ 1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 \right] R_s (m_0)'_{\lambda}}{W b m_0^2};$$

$$\xi = \left[ \varepsilon' - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2 \right]^2 + (\varepsilon'')^2; \quad (\beta_0)'_{\lambda} = \frac{-k \left( m_0^2 + \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2 \right)}{m_0 \lambda};$$

$$(R_s)'_{\lambda} = -\frac{\pi \sqrt{c \lambda \sigma_m} \cdot 10^{-7}}{\lambda^2 \sigma_m}; \quad m_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}; \quad (m_0)'_{\lambda} = \frac{-\lambda}{m_0 (2a)^2}$$

тут  $\alpha_{\partial}$  – втрати в діелектрику;  $\alpha_m$  – втрати в стінках хвилеводу;  $\lambda_{cr}$  – критична довжина хвилі;  $W \cong 120\pi/\sqrt{\varepsilon'}$ ;  $a, b$  – поперечні розміри хвилеводу;  $\sigma_m$  – провідність стінок хвилеводу;  $k$  - хвилеве число вакууму.

Символи, які входять до складу формул (3), (4) визначаються як

$$\frac{1}{\dot{R}} \frac{\partial \dot{R}}{\partial \varepsilon'} = \frac{\dot{a}'_{\varepsilon'} \dot{b} - \dot{a} \dot{b}'_{\varepsilon'}}{\dot{\rho}(1 - \dot{F}^2)(1 - \dot{\rho}^2 \dot{F}^2)}; \quad \frac{1}{\dot{R}} \frac{\partial \dot{R}}{\partial \varepsilon''} = \frac{\dot{a}'_{\varepsilon''} \dot{b} - \dot{a} \dot{b}'_{\varepsilon''}}{\dot{\rho}(1 - \dot{F}^2)(1 - \dot{\rho}^2 \dot{F}^2)};$$

$$\dot{a}'_{\varepsilon'} \dot{b} = e^{i\varphi} \{(\rho'_{\varepsilon'} + i\rho\varphi'_{\varepsilon'}) (1 - \dot{F}^2) + 2\rho l \dot{F}^2 [i(\beta_1)'_{\varepsilon'} + (\alpha_1)'_{\varepsilon'}]\} (1 - \dot{\rho}^2 \dot{F}^2);$$

$$\dot{a}'_{\varepsilon''} \dot{b} = e^{i\varphi} \{(\rho'_{\varepsilon''} + i\rho\varphi'_{\varepsilon''}) (1 - \dot{F}^2) + 2\rho l \dot{F}^2 [i(\beta_1)'_{\varepsilon''} + (\alpha_1)'_{\varepsilon''}]\} (1 - \dot{\rho}^2 \dot{F}^2);$$

$$\dot{a} \dot{b}'_{\varepsilon'} = 2\dot{\rho}(1 - \dot{F}^2) \left[ \rho^2 l (\alpha_1)'_{\varepsilon'} - \rho \rho'_{\varepsilon'} - i\rho^2 (\varphi'_{\varepsilon'} - l(\beta_1)'_{\varepsilon'}) \right] \dot{F}^2 e^{i2\varphi};$$

$$\dot{a} \dot{b}'_{\varepsilon''} = 2\dot{\rho}(1 - \dot{F}^2) \left[ \rho^2 l (\alpha_1)'_{\varepsilon''} - \rho \rho'_{\varepsilon''} - i\rho^2 (\varphi'_{\varepsilon''} - l(\beta_1)'_{\varepsilon''}) \right] \dot{F}^2 e^{i2\varphi};$$

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

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

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

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

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

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

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

$$(\alpha_1)'_{\varepsilon'} = (\alpha_{\delta})'_{\varepsilon'} + (\alpha_{\mathcal{M}})'_{\varepsilon'}; \quad (\alpha_1)'_{\varepsilon''} = (\alpha_{\delta})'_{\varepsilon''};$$

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

$$(\alpha_{\delta})'_{\varepsilon''} = \frac{k\varepsilon''}{2\sqrt{2}\sqrt{\xi}\sqrt{\sqrt{\xi} - \varepsilon' + \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2}}; \quad (\alpha_{\delta})'_{\varepsilon'} = -\frac{R_s\sqrt{\varepsilon'}\left(1 + \frac{2b}{a}\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2\right)}{2W_0 bm_0}.$$

На рис. 1 наведено типові частотні залежності коефіцієнтів  $S_l^{\text{arg } \dot{R}}$ ,  $S_{\lambda}^{\text{arg } \dot{R}}$ ,  $S_{\varepsilon'}^{\text{arg } \dot{R}}$ , та  $S_{\varepsilon''}^{\text{arg } \dot{R}}$ , побудовані за виразами (1)-(4) відповідно. Для спільності аналізу параметри зразка взято ті ж самі, що і в [6].

Аналіз цих частотних залежностей дозволяє зробити наступні висновки:

- всі чотири залежності мають яскраво виражені екстремуми кінцевої величини, розташовані, природно, на резонансних частотах;
- на частотних інтервалах між резонансними частотами екстремуми відповідають частотам антирезонансів;

- при збільшенні частоти значення коефіцієнтів  $S_l^{\text{arg } \dot{R}}$ ,  $S_{\lambda}^{\text{arg } \dot{R}}$  та  $S_{\varepsilon'}^{\text{arg } \dot{R}}$  швидко збільшуються (їхня обвідна пропорційна залежності  $\rho(f)$ ), у коефіцієнта  $S_{\varepsilon''}^{\text{arg } \dot{R}}$  збільшення неістотне;

- діапазони значень коефіцієнтів  $S_l^{\text{arg } \dot{R}}$ ,  $S_{\lambda}^{\text{arg } \dot{R}}$  та  $S_{\varepsilon'}^{\text{arg } \dot{R}}$  практично співставні між собою. Коефіцієнт  $S_{\varepsilon''}^{\text{arg } \dot{R}}$ , як і у випадку модулів коефіцієнтів відбиття і передачі, має набагато менший діапазон значень.

Трансформація частотних залежностей цих коефіцієнтів при збільшенні довжини зразка до п'яти разів (при  $\varepsilon' = \text{const}$ ) не спричиняє істотного збільшення діапазонів значень всіх чотирьох коефіцієнтів. При цьому залежності для коефіцієнтів  $S_l^{\text{arg } \dot{R}}$  та  $S_{\varepsilon'}^{\text{arg } \dot{R}}$  зміщуються по вісі ординат в сторону менших значень, залежність для коефіцієнта  $S_{\lambda}^{\text{arg } \dot{R}}$  – в сторону більших значень, а діапазон значень коефіцієнта  $S_{\varepsilon''}^{\text{arg } \dot{R}}$  зменшується на кілька сотих. Характер обвідної всіх чотирьох коефіцієнтів залишаються незмінним, кількість частот екстремумів, природно, збільшується.

При збільшенні  $\varepsilon'$  спостерігається таке: істотне збільшення коефіцієнтів  $S_l^{\text{arg } \dot{R}}$ ,  $S_\lambda^{\text{arg } \dot{R}}$  та  $S_{\varepsilon'}^{\text{arg } \dot{R}}$  ( $S_l^{\text{arg } \dot{R}}$  приблизно на два порядки,  $S_\lambda^{\text{arg } \dot{R}}$  та  $S_{\varepsilon'}^{\text{arg } \dot{R}}$  – приблизно на порядок при збільшенні  $\varepsilon'$  на порядок), резонансні піки цих коефіцієнтів звужуються, їхня кількість збільшується; характер обвідної залишається незмінним. В коефіцієнта  $S_{\varepsilon''}^{\text{arg } \dot{R}}$  діапазон значень практично незмінний, кількість резонансних піків збільшується, характер обвідної також незмінний.

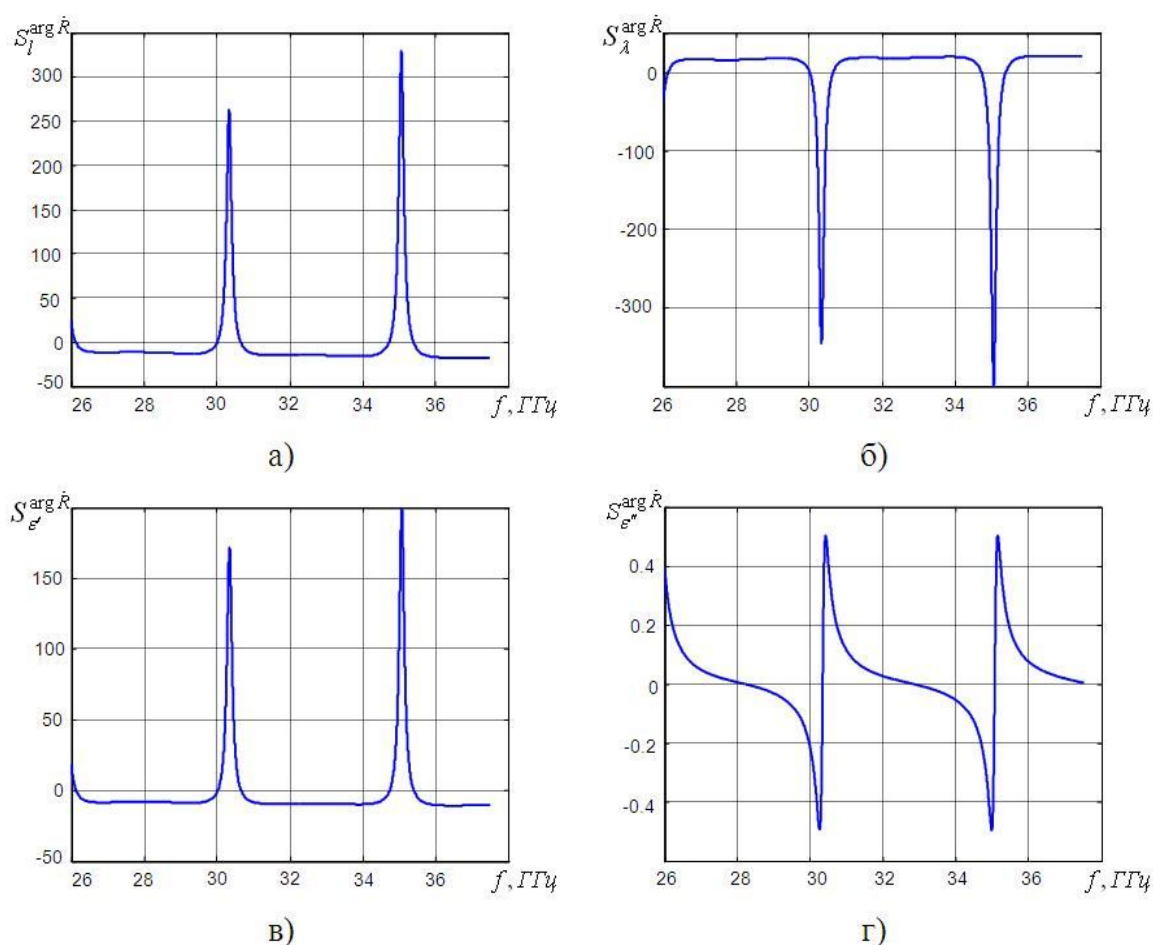


Рис. 1. Частотні залежності коефіцієнтів  $S_l^{\text{arg } \dot{R}}$  (а),  $S_\lambda^{\text{arg } \dot{R}}$  (б),  $S_{\varepsilon'}^{\text{arg } \dot{R}}$  (в),  $S_{\varepsilon''}^{\text{arg } \dot{R}}$  (г) при  $l = 20$  мм,  $\varepsilon = 2(1 - i0,0064)$ .

На частотних інтервалах між резонансними частотами також відбувається трансформація, але лише в коефіцієнтів  $S_l^{\text{arg } \dot{R}}$ ,  $S_\lambda^{\text{arg } \dot{R}}$  та  $S_{\varepsilon'}^{\text{arg } \dot{R}}$  (рис. 2).

При збільшенні  $\varepsilon''$  спостерігається протилежний ефект: зменшення абсолютних рівнів всіх чотирьох коефіцієнтів, а їхні частотні залежності на-

бувають осцилюючого характеру з екстремумами на резонансних та антирезонансних частотах.

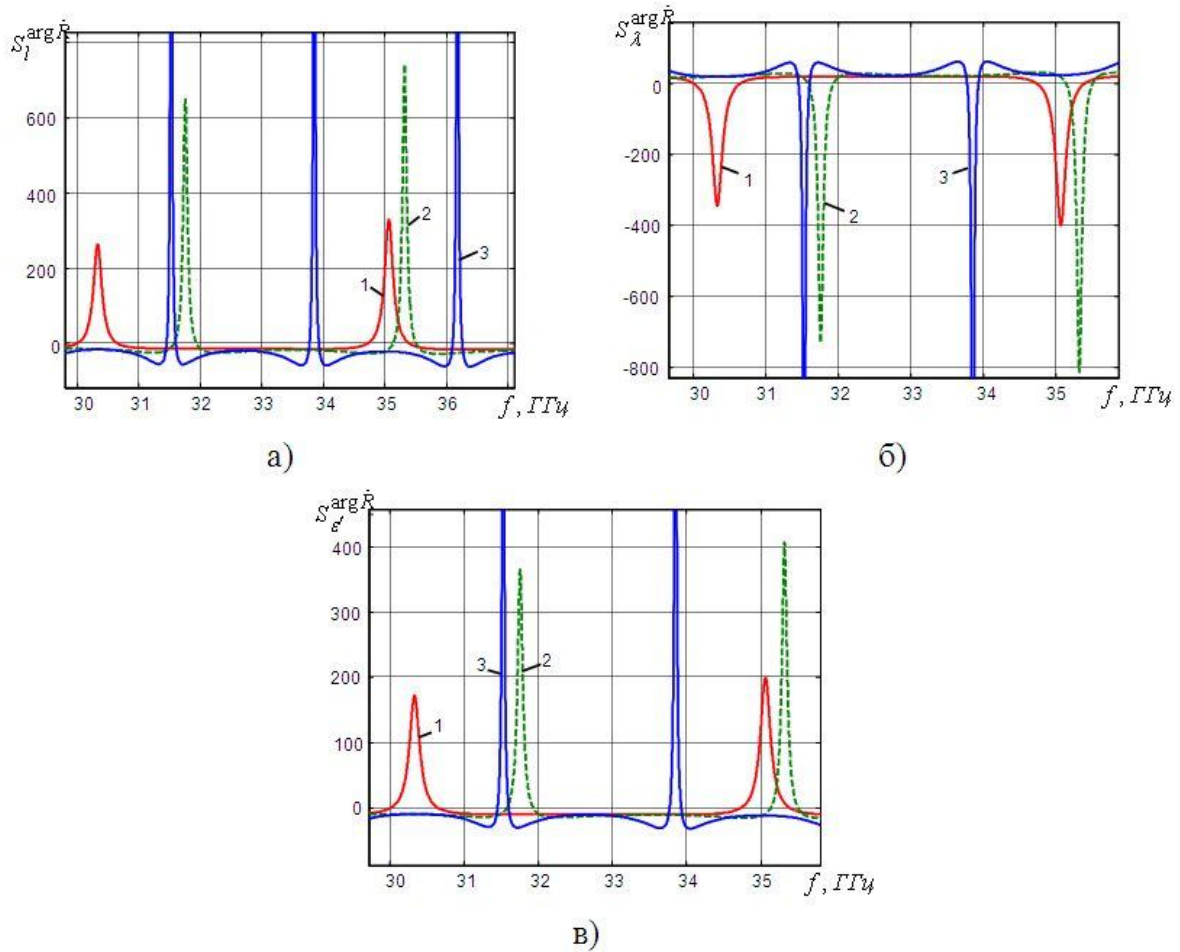


Рис. 2. Зміна частотних залежностей коефіцієнтів  $S_i^{\text{arg } \dot{R}}$  (а),  $S_\lambda^{\text{arg } \dot{R}}$  (б),  $S_{\epsilon'}^{\text{arg } \dot{R}}$  (в) при збільшенні  $\epsilon'$ :  $\epsilon' = 2(1 - i0,0064)$  (1),  $\epsilon' = 4(1 - i0,0032)$  (2),  $\epsilon' = 10(1 - i0,0013)$  (3),  $l = 20 \text{ мм}$  (1) – (3)

### Висновки.

Проведений аналіз чутливості фазового кута коефіцієнта відбиття дозволяє зробити такі висновки: частотні залежності коефіцієнтів  $S_i^{\text{arg } \dot{R}}$ ,  $S_\lambda^{\text{arg } \dot{R}}$ ,  $S_{\epsilon'}^{\text{arg } \dot{R}}$  і  $S_{\epsilon''}^{\text{arg } \dot{R}}$  мають яскраво виражені піки кінцевої величини, розташовані на резонансних частотах; при збільшенні частоти значення коефіцієнтів  $S_i^{\text{arg } \dot{R}}$  збільшуються; діапазони значень коефіцієнтів  $S_{\epsilon'}^{\text{arg } \dot{R}}$  та  $S_{\epsilon''}^{\text{arg } \dot{R}}$  набагато менші (приблизно на порядок) за діапазони значень інших коефіцієнтів  $S_i^{\text{arg } \dot{R}}$ ,  $S_\lambda^{\text{arg } \dot{R}}$ . При збільшенні  $l$  та  $\epsilon'$  спостерігається збільшення діапазонів значень всіх коефіцієнтів, а збільшення  $\epsilon''$  спричиняє зворотній ефект. В цілому, підтверджено доцільність проведення вимірювань на резонансних частотах, причому точність вимірювань буде більшою при довгих зразках,

ніж при коротких, а 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” (КрыМиКо’2010). – 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” (КрыМиКо’2009). – 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” (КрыМиКо’2007). – 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” (КрыМиКо’2005). – 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” (КрыМиКо’2007). – Севастополь: Вебер. – 2007. – С. 710-711.
8. Трушкин А. Н. Измеритель комплексного коэффициента отражения миллиметрового диапазона волн на основе двенадцатиполосника // Материалы 20-й Международной Крымской конференции „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2010). – Севастополь: Вебер. – 2005. – С. 973-974.

*Семенов А. О., Семенова О. О., Чухов В. В. Аналіз чутливості фазового кута коефіцієнта відбиття хвилевідної вимірювальної комірки у випадку слабкопоглинаючого діелектрика. При вимірюванні параметрів хвилевідної вимірювальної комірки у вигляді відрізка прямокутного хвилеводу з плоскошаровим діелектриком з точки зору точності вимірювань потрібно проаналізувати чутливість цих параметрів до зміни таких впливних величин, як довжина зразка, довжина хвилі, діелектрична проникність зразка. На сьогоднішній день здійснено аналіз чутливості модуля та аргументу коефіцієнта відбиття для діелектрика без втрат, а також для модулів коефіцієнтів відбиття та передачі у випадку слабкопоглинаючого діелектрика. Проте залишається відкритим питання про чутливість фазового кута коефіцієнта відбиття хвилевідної вимірювальної комірки у випадку слабкопоглинаючого діелектрика. В роботі дану задачу розв’язано шляхом застосування коефіцієнтів чутливості. Отримано аналітичні*



вирази цих коефіцієнтів чутливості, побудовано їхні частотні залежності та проаналізовано характер цих залежностей, у т. ч. при зміні довжини зразка та його комплексної діелектричної проникності. В цілому підтверджено доцільність проведення вимірювань на резонансних частотах, причому точність вимірювань буде більшою при довгих зразках, ніж при коротких, а довжина зразків обмежуватиметься, в першу чергу, чутливістю вимірювальних приладів.

**Ключові слова:** вимірювальна комірка, коефіцієнт відбиття, діелектрична проникність, слабкопоглинаючий діелектрик,

Семенов А. А., Семенова Е. А., Чухов В. В. **Анализ чувствительности фазового угла коэффициента отражения волноводной измерительной ячейки в случае слабо поглощающего диэлектрика.** При измерении параметров волноводной измерительной ячейки в виде отрезка прямоугольного волновода с плоскостойким диэлектриком с точки зрения точности измерений нужно проанализировать чувствительность этих параметров к изменению таких влияющих величин, как длина образца, длина волны, диэлектрическая проницаемость образца. На сегодняшний день осуществлен анализ чувствительности модуля и аргумента коэффициента отражения для диэлектрика без потерь, а также для модулей коэффициентов отражения и передачи в случае слабопоглощающего диэлектрика. При этом остается открытым вопрос о чувствительности фазового угла коэффициента отражения волноводной измерительной ячейки для слабопоглощающего диэлектрика. В работе эта задача решена с помощью коэффициентов чувствительности. Получены аналитические выражения этих коэффициентов чувствительности, построены их частотные зависимости и проанализирован характер этих зависимостей, в т.ч. при изменении длины образца и его комплексной диэлектрической проницаемости. В целом подтверждена целесообразность проведения измерений на резонансных частотах, причем точность измерений будет большей при длинных образцах, нежели при коротких, а длина образцов будет ограничена, в первую очередь, чувствительностью измерительных приборов.

**Ключевые слова:** измерительная ячейка, коэффициент отражения, диэлектрическая проницаемость, слабо поглощающий диэлектрик

A.Semenov, E.Semenova A, V.Chuhov. **Sensitivity analysis of the phase angle of the reflection coefficient of waveguide measurement cell in the case of low loss dielectric.** In problem for rectangular waveguide segment with dielectric layer parameters measurement we must analyze sensitivity these parameters to changes some influencing values, like segment length, wavelength and specimen dielectric permittivity. Analyze module and phase angle of reflection coefficient sensitivity for dielectric without loss and analyze module and phase angle of reflection and transmission coefficients sensitivity for low loss dielectric are made at present day. But we must know reflection coefficient phase angle sensitivity of waveguide measurement cell in case of low loss dielectric in some applied problems. In article this problem is solved by help of sensitivity coefficients. Analytical formulas for these coefficients are obtained and their frequency dependencies for segment length and complex dielectric permittivity changes are analyzed also. Measurements at resonant frequencies appropriateness are certified. But we obtain more accuracy, when we use longer specimen than shorter specimen, and specimen length is limited by measurement devices sensitivity even so.

**Key words:** measuring cell, the reflection coefficient, dielectric constant, low loss dielectric