

## МОДЕЛЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ПЕРЕДАЧІ І ВІДБИТТЯ ПРЯМОКУТНОГО ХВИЛЕВОДУ З ФЕРИТОВИМ ЗОНДОМ ВИБІРНИХ НВЧ ВАТМЕТРІВ БАГАТОМОДОВОЇ ПОТУЖНОСТІ

У статті наведено результати математичного моделювання коефіцієнтів передачі і відбиття прямокутного хвильоводу з феритовим зондом вибірних НВЧ ватметрів багатомодової потужності. Математичні моделювання проведено для випадку поширення трьох нижчих типів хвиль багатомодового режиму роботи прямокутного хвильоводу.

Ключові слова: хвильовод, багатомодовий, ватметр.

A.O. SEMENOV, O.O. SEMENOVA, M.A. SHUTYLO, YE.F. LUTSKIY, O.V. ZUBAREV  
Vinnytsia National Technical University

### MODELING OF TRANSMISSION AND REFLECTION COEFFICIENTS OF A RECTANGULAR WAVEGUIDE WITH A FERROD OF SELECTIVE MICROWAVE WATTMETERS OF MULTIMODE POWER

*Abstract – In the article the results of mathematical modeling for transmission and reflection coefficients of a rectangular waveguide with a ferrod of selective microwave wattmeters of multimode power are presented. The mathematical modeling has been carried out for the case of three lower wave types spreading at the multimode operation of the rectangular waveguide.*

*Equations of the transmission and reflection coefficients in general view have been shown. It has been shown, that changing a radius of the ferrod does not cause changes in dependence of the reflection coefficient on the ferrod's position in the waveguide; only maximal values have been changed. The higher is the radius, the higher are the reflection coefficients. Also the dependence of the transmission and reflection coefficients on different values of a resonance curve's half-width has been examined. It has been shown that the transmission coefficient weakly depended on constant magnetization. The presented mathematical model is adequate only for spreading no more than three lower types magnetic waves through the waveguide of a standard cut.*

#### Вступ

На даний час існує цілий ряд приладів і пристроїв НВЧ, що використовують явище феромагнітного резонансу: перестроювані твердотільні НВЧ генератори на основі лавинно-пролітних діодів і діодів Ганна, селективні вимірювачі НВЧ потужності, феритові смугові фільтри та ін. У таких приладах застосовується лише властивості однорідної прецесії феромагнітного резонансу, в той час як виникнення резонансів неоднорідних типів прецесії (особливо в багатомодовому режимі) може суттєво впливати на їхню роботу, внаслідок чого параметри та характеристики цих приладів або пристроїв виходять за межі заданих значень. Дослідження феритового зонду для вибірних НВЧ ватметрів багатомодової потужності, що використовує явище резонансного поглинання НВЧ енергії в феритовій кулі, є перспективними. Ця задача має важливе значення, оскільки її результати можуть бути використані для контролю частотних характеристик НВЧ передавачів, дослідження вибірності радіоприймальних пристроїв, вимірювання рівня позасмугових випромінювань. Існуючі методи дослідження феритових зондів для вибірних НВЧ ватметрів багатомодової потужності, основані на багатомодових спрямованих відгалужувачах потужності, поперечному і поздовжньому зондуванні з наступною обробкою даних за допомогою математичного апарату перетворення Фур'є, мають суттєві недоліки. Багатомодові НВЧ ватметри досліджуються за допомогою феритових зондів виходячи з припущення про наявність не більш ніж чітко обумовленої кількості типів електромагнітних хвиль. Коли ж в лінії передачі виникає тип хвилі, не передбачений при дослідженні, то потужність, що переноситься даним типом хвилі, не може бути виміряна зазначеним методом. Стосовно методів поздовжнього і поперечного зондування – для підвищення точності вимірів потрібна велика кількість зондів, що призводить до значного ускладнення конструкції вимірювальної секції.

Таким чином, задача дослідження феритового перетворювача для вибірних НВЧ ватметрів багатомодової потужності за допомогою феритового зонду є актуальною і має суттєве прикладне значення.

#### Розробка математичної моделі

У прямокутному хвильоводі з розмірами  $a \times b$  знаходиться ізотропний феритовий зонд сферичної форми (мала феритова куля) радіусом  $r_0$  (рис. 1).

Електромагнітні коливання поширюються в напрямку осі  $y$ . Постійне підмагнічуюче поле  $H_0$  спрямоване по осі  $z$ . Відповідно до введеної системи координат (рис. 1) феритова куля має координати  $x_0, y_0, z_0$ . Радіус феритової сфери задовольняє умові  $kr_0 \ll 1$ , де  $k$  – стала поширення. Тобто радіус кулі набагато менший довжини хвилі, яка поширюється в хвильоводі,

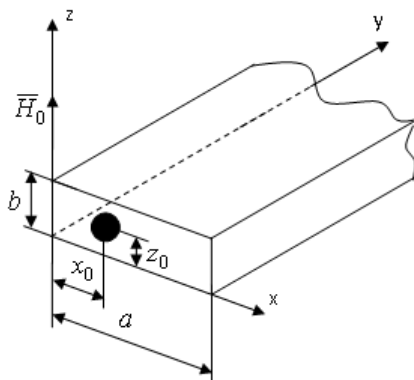


Рис. 1. Феритовий зонд сферичної форми в прямокутному хвильоводі

що дозволяє знехтувати взаємодією обміну і вирішувати задачу в магнітостатичному наближенні.

Рівняння коефіцієнтів передачі та відбиття у загальному випадку мають вигляд [1]

$$\tau = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{iy} \left[ 1 + |C_{+s,i}|^2 + 2 \operatorname{Re}(C_{+s,i}) \right]}{\sum_{i=1}^n k_{iy}}, \quad (1)$$

$$\rho = \frac{P_3}{P_2} = \frac{\sum_{i=1}^n |C_{-s,i}|^2 k_{iy}}{\sum_{i=1}^n k_{iy}}. \quad (2)$$

де  $P_2$  і  $P_1$  відповідно потужності пройденої та падаючої хвиль,  $P_3$  - потужність відбитих хвиль,

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$  - стала поширення електромагнітної хвилі,  $C_{+s,i}$  - коефіцієнти збудження прямокутного хвильоводу

феритовою кулею, загальна формула розрахунку яких [1]

$$C_{\pm s}^{lm} = \frac{i}{2\sqrt{2}k_s} \sum_{k=\pm 1} H_{l-1,\pm(m+k),k}^{\mp s} \cdot (-1)^{\binom{0}{m+k}} \cdot r_0^{2l+1} \times \\ \times \left\{ (\chi + k\nu) \cdot \left[ \sqrt{\frac{(l-km)(l-km-1)}{(2l+1)(2l-1)}} \cdot A_{lm}^l - \frac{2}{2l+1} \cdot \sqrt{\frac{(l+km)(l+km-1)}{(2l-1)(2l+3)}} \cdot A_{l-2,m}^l \right] \right\},$$

де  $(-1)^{\binom{0}{m+k}} = (-1)^0 = 1$  для випадку  $C_{+s}$ ;  $(-1)^{\binom{0}{m+k}} = (-1)^{m+k}$  для випадку  $C_{-s}$ ;

$\chi, \nu$  - компоненти тензора магнітної сприйнятливості, який описується рівнянням [2]

$$\|\chi\| = \begin{vmatrix} \chi & i\nu \\ -i\nu & \chi \end{vmatrix},$$

$H_{l-1,\pm(m+k),k}^{\mp s}$  - коефіцієнти, які визначаються співвідношеннями [3]

$$H_{lm\ x'}^{\pm} = -(\mp i)^l \cdot \frac{Ak_x k_y}{4} \cdot (M_1 - N_1) e^{\mp i k_1 \bar{R}} \cdot g_l(kr) \cdot Y^{\mp}(l, m | \bar{r}), \\ H_{lm\ y'}^{\pm} = (\mp i)^l \cdot \frac{A(k^2 - k_y^2)}{4} \cdot (M_1 + N_1) e^{\mp i k_1 \bar{R}} \cdot g_l(kr) \cdot Y^{\mp}(l, m | \bar{r}); \\ H_{lm\ z'}^{\pm} = -(\mp i)^l \cdot \frac{Ak_z k_y}{4} \cdot (M_2 + N_2) e^{\mp i k_1 \bar{R}} \cdot g_l(kr) \cdot Y^{\mp}(l, m | \bar{r}), \\ M_1 = \left[ 1 + (-1)^{l+m} \cdot e^{\pm 2ik_z z_0} \right] Y^{\pm}(l, m | \bar{k}_1), \\ M_2 = \left[ 1 - (-1)^{l+m} \cdot e^{\pm 2ik_z z_0} \right] Y^{\pm}(l, m | \bar{k}_1), \\ N_1 = \left[ (-1)^m + (-1)^l \cdot e^{\pm 2ik_z z_0} \right] \cdot e^{\pm 2ik_x x_0} \cdot Y^{\mp}(l, m | \bar{k}_1), \\ N_2 = \left[ (-1)^m - (-1)^l \cdot e^{\pm 2ik_z z_0} \right] \cdot e^{\pm 2ik_x x_0} \cdot Y^{\mp}(l, m | \bar{k}_1). \\ E_{lm\ x'}^{\pm} = \pm (\mp i)^l \cdot \frac{Akk_z}{4} \cdot (M_2 + N_2) e^{\mp i k_1 \bar{R}} \cdot g_l(kr) \cdot Y^{\mp}(l, m | \bar{r}), \\ E_{lm\ y'} = 0;$$

$$E_{lm}^{\pm} = \mp (\mp i)^l \cdot \frac{Ak_x k}{4} \cdot (M_1 - N_1) e^{\mp i k_1 \bar{R}} \cdot g_l(kr) \cdot Y^{\mp}(l, m | \bar{r}),$$

$A_{lm}^l, A_{l-2,m}^l$  - амплітуди внутрішнього поля, які визначаються співвідношеннями [3]

$$r_0^l \cdot l \cdot A_{lm}^{\text{пад}} - \frac{l+1}{r_0^{l+1}} \cdot A_{lm}^{\text{розс}} = r_0^l \left\{ A_{lm}^l \cdot \left[ l + \chi \cdot \frac{l(l-1)+m^2}{2l-1} - m \cdot \nu \right] - \right. \\ \left. - \frac{2 \cdot \chi}{2l-1} \sqrt{\frac{(l+m)(l-m)(l+m-1)(l-m-1)}{(2l+1)(2l-3)}} \cdot A_{l-2,m}^l \right\},$$

$$r_0^l \cdot A_{lm}^{\text{пад}} + \frac{1}{r_0^{l+1}} \cdot A_{lm}^{\text{роз}} = r_0^l \cdot A_{lm}^l$$

$$\frac{\chi}{2l+3} \sqrt{\frac{(l+m+2)(l-m+2)(l+m+1)(l-m+1)}{(2l+1)(2l+5)}} \cdot (n+l+1)(n+l+3) \cdot A_{l+2,m}^n -$$

$$- \left[ 2\chi \cdot \frac{l(l+1)+m^2-1}{(2l-1)(2l+3)} + 1 \right] \times (n-l)(n+l+1) \cdot A_{l,m}^n +$$

$$+ \frac{\chi}{2l-1} \sqrt{\frac{(l+m-1)(l-m-1)(l+m)(l-m)}{(2l+1)(2l-3)}} \cdot (n-l)(n-l+2) \cdot A_{l-2,m}^n = 0.$$

Для того, щоб при розрахунках коефіцієнтів передачі (1) та відбиття (2) виконувались енергетичні співвідношення в хвильоводі, необхідно врахувати втрати на випромінювання [1]

$$\alpha = \alpha_t + \alpha_i. \quad (3)$$

У рівнянні (3) теплові втрати визначаються як  $\alpha_t = \frac{\Delta H \cdot \gamma}{\omega}$ , де  $\Delta H$  – напівширина резонансної

кривої фериту;  $\gamma = g \frac{|e|}{2mc} = 2,8 \cdot 2\pi \cdot 10^6 \text{ [E}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}]$  – магнітомеханічне відношення ( $e$  – заряд електрона,  $m$  – маса спокою електрона,  $c$  – швидкість світла,  $g$  – фактор Ланде),  $\omega$  – кругова частота. Складові  $\alpha_i$  визначається величиною поглинутої феритовим зондом потужності [3]

$$P_4 = -\frac{\omega}{16\pi} \cdot \frac{r_0^{2l+1}}{2l+1} \cdot \text{Im} \sum_{k=\pm 1} \left\{ (\chi + kv) \cdot \left| (2l+1) \sqrt{\frac{(l-km)(l-km-1)}{(2l-1)(2l+1)}} \cdot A_{lm}^l - \right. \right.$$

$$\left. - 2 \sqrt{\frac{(l+km)(l+km-1)}{(2l-1)(2l-3)}} \cdot A_{l-2,m}^l \right|^2 \Bigg\}.$$

### Результати математичного моделювання та їхній аналіз

У роботі проведено моделювання коефіцієнтів передачі і відбиття прямокутного хвильоводу з феритовим зондом для таких значень параметрів хвильоводу та феритового зонду:  $a \times b = 23 \times 10 \text{ мм}$ ;  $f = 10 \text{ ГГц}$ ;  $4\pi M_0 = 1780 \text{ Гс}$ ;  $\Delta H = 0,8E$ ;  $z_0 = b/2$ .

Як видно з рис. 2,а, зміна радіуса феритового зонду не приводить до якісних змін залежності коефіцієнта відбиття від положення феритового зонду в хвильоводі, а змінюються лише максимальні значення. Більшим значенням радіуса феритового зонду відповідають більші значення коефіцієнта відбиття.

Коефіцієнт передачі в точці хвильоводу  $x_0 \approx a/4$  (рис. 2,б) зі збільшенням  $r_0$  (до певного значення) зменшується, при подальшому збільшенні радіуса феритового зонду спостерігається зростання коефіцієнту передачі в даній точці. Дослідимо коефіцієнти передачі і відбиття при різних значеннях намагніченості феритового зонду  $4\pi M_0$  ( $r_0 = 0,6 \text{ мм}$ ). Співставляючи рис. 2,а та рис. 3,а, приходимо до висновку, що залежність коефіцієнта відбиття від постійної намагніченості якісно повторює вище наведену залежність коефіцієнта відбиття від радіуса феритового зонду, а тому попередньо зроблені відповідні коментарі в тій же мірі справедливі і для залежності рис. 3,а.

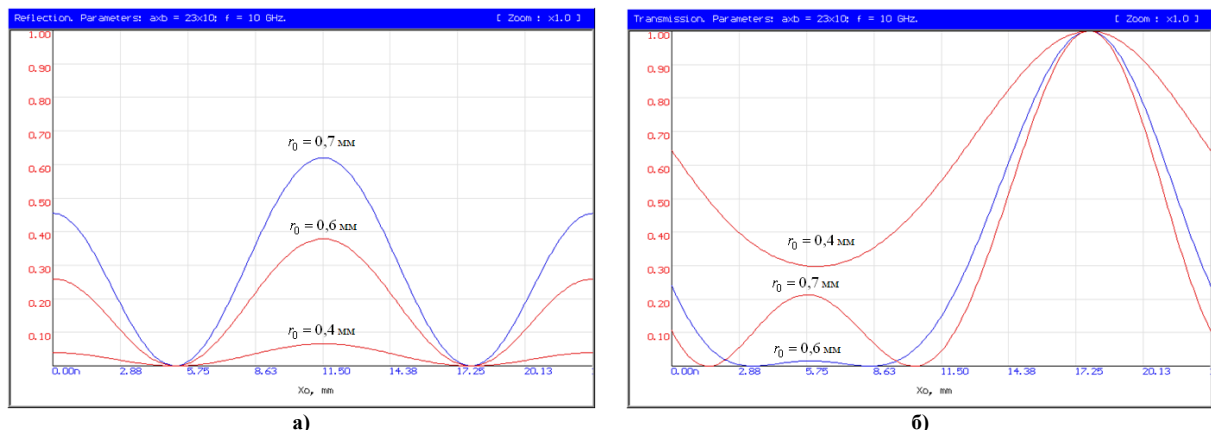


Рис. 2. Графіки залежностей коефіцієнтів відбиття (а) і передачі (б) від радіуса та координати феритового зонду в хвильоводі

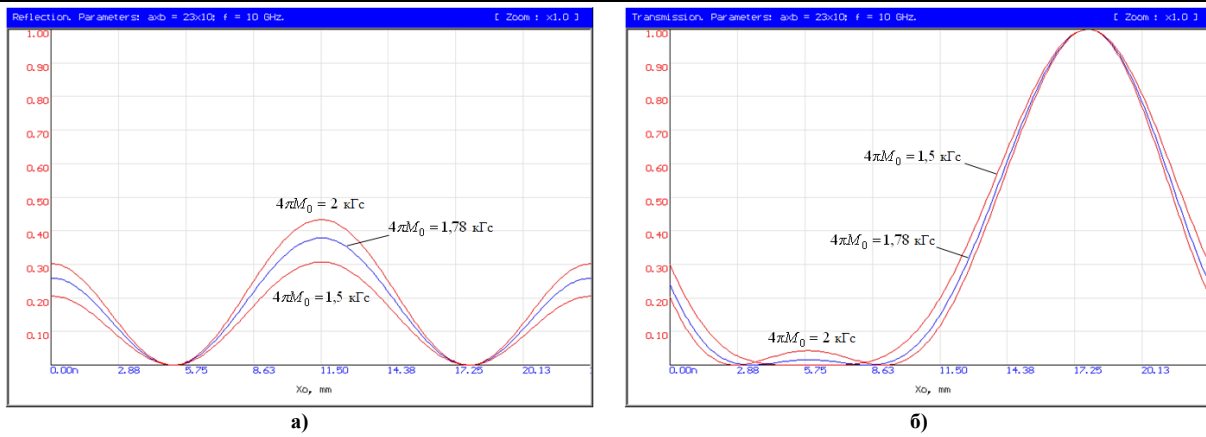


Рис. 3. Графіки залежностей коефіцієнтів відбиття (а) і передачі (б) від постійної намагніченості та координати феритового зонду в хвильоводі

У роботі розглянуто залежності коефіцієнта передачі від постійної намагніченості (рис. 3,б). Очевидно, що коефіцієнт передачі у цьому випадку слабо залежить від постійної намагніченості, і тому ця залежність не становить значного інтересу. Тому надалі дослідження проведено при  $4\pi M_0 = 1780$  Гс.

Також у роботі досліджено коефіцієнти передачі і відбиття при різних значеннях напівширини резонансної кривої  $\Delta H$  феритового зонду. Інші параметри аналогічні попередньому випадку. Результати наведено на рис. 4,а і рис. 4,б.

З рис. 4,б випливає, що при зменшенні  $\Delta H$  відбувається значне збільшення абсолютних значень коефіцієнтів відбиття. Характер залежності коефіцієнта відбиття від координати  $x_0$  не змінюється. З аналізу рис. 4,б слідує, що при зменшенні  $\Delta H$ , починаючи із значення приблизно  $0,8$  Е, відбувається різке збільшення коефіцієнта передачі в точці хвильоводу  $x_0 = a/4$ .

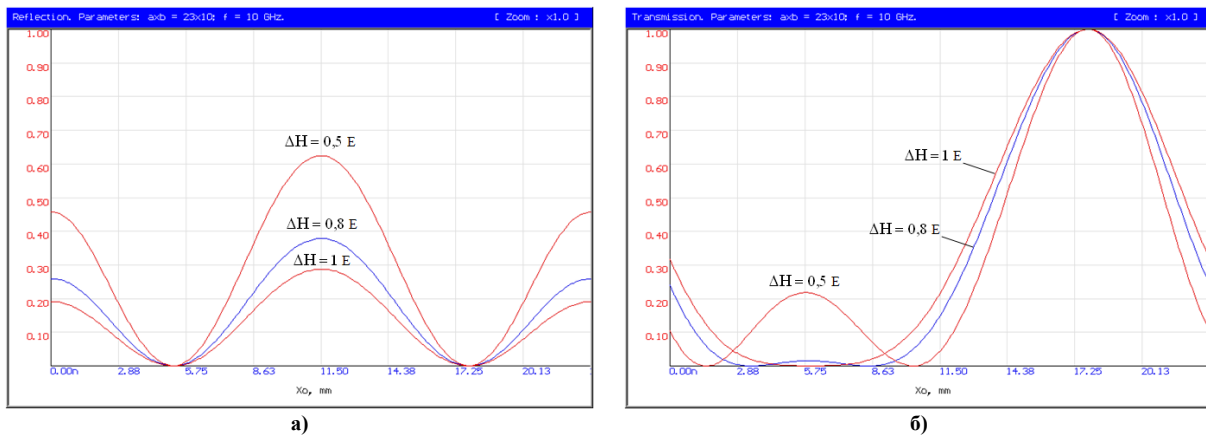


Рис. 4. Графіки залежностей коефіцієнтів відбиття (а) і передачі (б) від напівширини резонансної кривої та координати феритового зонду в хвильоводі

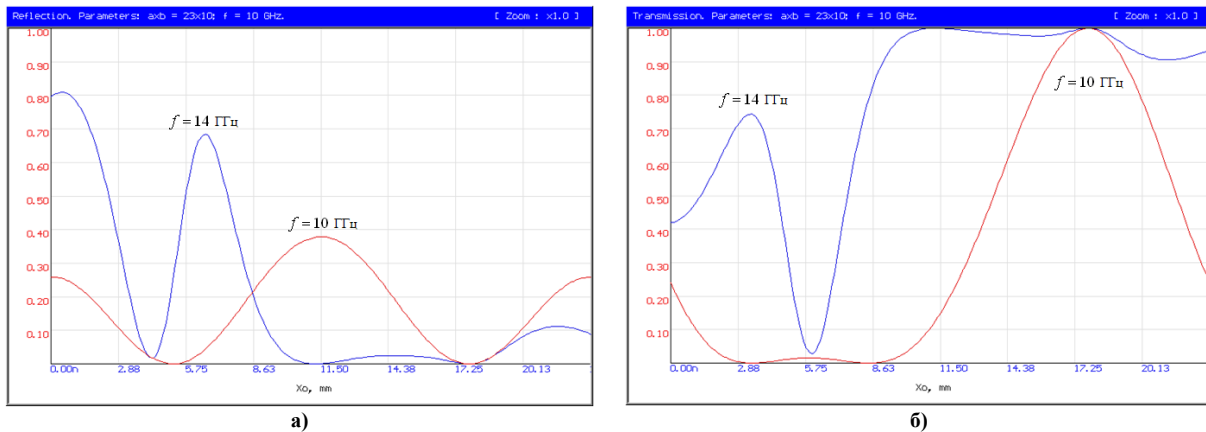


Рис. 5. Графіки залежностей коефіцієнтів відбиття (а) і передачі (б) від координати феритового зонду в хвильоводі на частотах 10 ГГц та 14 ГГц

Залежності на рис. 2,а – рис. 4,б досліджувалися в одномодовому режимі, коли в прямокутному

хвильоводі присутня лише хвиля типу  $H_{10}$ . Було проведено дослідження коефіцієнтів передачі та відбиття в умовах, коли в хвильоводі поширюються хвилі типів  $H_{10}$ ,  $H_{20}$ . Графіки даних залежностей для частот 10 ГГц ( $H_{10}$ ) та 14 ГГц ( $H_{10}$ ,  $H_{20}$ ) наведені на рис. 5,а-б.

На частоті  $f = 16$  ГГц в хвильоводі заданих розмірів можуть поширюватися хвилі типів  $H_{10}$ ,  $H_{20}$ ,  $H_{01}$ . Залежності коефіцієнтів передачі та відбиття для цього випадку наведені на рис. 6.

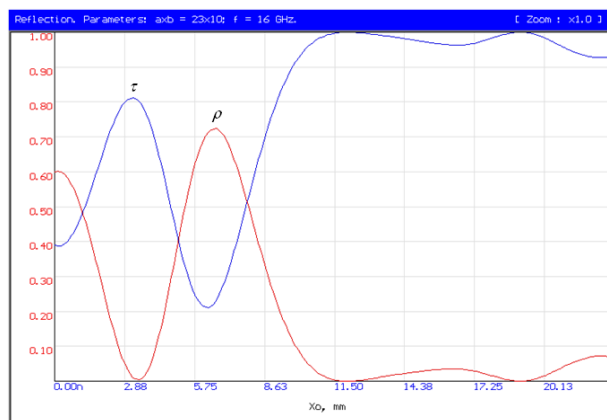


Рис. 6. Залежність коефіцієнта передачі  $\tau$  і коефіцієнта відбиття  $\rho$  від координати феритового зонду в прямокутному хвильоводі на частоті 16 ГГц для мод  $H_{10}$ ,  $H_{20}$ ,  $H_{01}$

Як слідує із залежностей, наведених на рис. 5,а-б і рис. 6, у багатомодовому режимі при поширенні хвильоводом більше двох типів хвиль, однозначно судити про модовий склад хвильоводу лише на основі візуальної оцінки графіків відповідних залежностей стає важко. Тому запропоновану математичну модель зручно використовувати при поширенні прямокутним хвильоводом не більше 3-х типів хвиль.

#### Висновки

Запропоновано математичну модель і отримано результати моделювання коефіцієнтів передачі і відбиття прямокутного хвильоводу з феритовим зондом сферичної форми для випадку одномодового та багатомодового режимів роботи прямокутного хвильоводу. Математична модель адекватна при поширенні не більше 3-х молодших типів магнітних хвиль прямокутним хвильоводом стандартного перерізу.

#### Література

1. Вунтесмери В. С. Влияние электродинамической системы на параметры ферритового резонатора / В. С. Вунтесмери // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1992. – №3, 4.
2. Беляков С. В. Тензорные СВЧ-параметры трёхосного эллипсоида из монокристалла феррита с кубической кристаллической решёткой / С.В. Беляков // Электронная техника. Сер. 1. – 1992. – №6.
3. Geyer Richard G. Microwave characterization of ferrites / Geyer Richard G., Baker-Jarvis James. // IEEE Antennas and Propag. Soc. Int. Symp., Chicago, Ill. – 1992, – Dig. Vol. 4.

#### References

1. Vuntsemeri V. S. Vliyanie elektrodinamicheskoy sistemy na parametry ferritovogo rezonatora / V. S. Vuntsemeri // Izv. vuzov. Radioelektronika. – 1992. – №3, 4.
2. Belyakov S. V. Tenzornye SVCh-parametry tryohosnogo ellipsoida iz monokristalla ferrita s kubicheskoy kristallicheskoy reshyotkoy / S.V. Belyakov // Elektronnaya tehnika. Ser. 1. – 1992. – №6.
3. Geyer Richard G. Microwave characterization of ferrites / Geyer Richard G., Baker-Jarvis James. // IEEE Antennas and Propag. Soc. Int. Symp., Chicago, Ill. – 1992, – Dig. Vol. 4.

Рецензія/Peer review : 24.7.2013 р.

Надрукована/Printed : 14.10.2013 р.