

М. Ю. ІЛЬЧЕНКО

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕЯКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗАЄМОДІЇ СИСТЕМИ: КРУГЛИЙ ХВИЛЕВІД — ФЕРИТОВИЙ РЕЗОНАТОР

Мініатюрний феритовий еліпсоїд, намагнічений у режимі феромагнітного резонансу, поводить себе на НВЧ, як резонатор. Широке застосування таких резонаторів в пристроях НВЧ обумовлює необхідність дослідження взаємодії змінної намагніченості феритового резонатора з електромагнітними полями в різних лініях передачі НВЧ. Таке дослідження проведене для прямокутного хвилеводу [2—4] і для коаксіальної лінії [5, 6].

У даній статті досліджуються амплітудні та фазові характеристики взаємодії змінної намагніченості феритового резонатора з електромагнітними полями хвилі типу H_{11} круглого хвилеводу при розміщенні резонатора в точках з координатами $r_0, \alpha_0 = 0, \alpha_0 = \pi$ і прикладенні зовнішнього магнітного поля вздовж осі y (рис. 1). Вказано, що при розміщенні феритового резонатора в точках $\alpha_0 \neq 0, \alpha_0 \neq \pi$, крім амплітудних та фазових, спостерігаються поляризаційні явища.

Для визначення амплітудних та фазових співвідношень при відсутності поляризаційних явищ використовуємо вирази для характеристик взаємодії, наведені в роботах [7, 8]. При цьому треба знайти: потужність, що поглинається резонатором при резонансі,

$$P_{\Phi} = -\frac{1}{2} \omega \mu_0 \operatorname{Im} \int_{V_{\Phi}} \vec{m} \vec{H}^* dV; \quad (1)$$

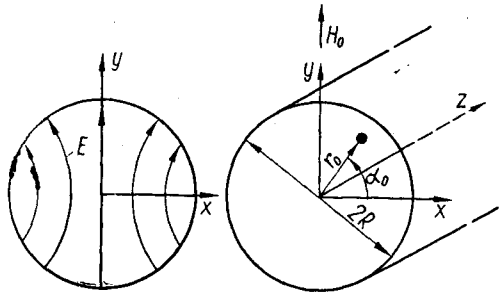


Рис. 1. Феритовий резонатор в узгодженому круглому хвилеводі.

потужність, що перевипромінюється резонатором при резонансі в напрямі до генератора,

$$P_n^- = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{S_n} [\vec{E}_n^- \vec{H}_n^{*-}] \vec{l} dS; \quad (2)$$

потужність, що перевипромінюється резонатором при резонансі в напрямі до навантаження,

$$P_n^+ = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{S_n} [\vec{E}_n^+ \vec{H}_n^{+*}] \vec{l} dS, \quad (3)$$

де ω — колова частота;

\vec{m} — змінна намагніченість феритового резонатора;

V_Φ — об'єм феритового резонатора;

S_n — площа поперечного перерізу лінії передачі;

$\vec{E}_n^\mp, \vec{H}_n^\mp$ — поля перевипромінювання, збуджувані \vec{m} відповідно в напрямках до генератора і до навантаження;

\vec{l} — одиничний вектор у напрямі поширення енергії.

При визначенні полів перевипромінювання обмежимося розглядом однорідної прецесії намагніченості, не враховуючи нелінійні ефекти та ефект поширення електромагнітних хвиль вздовж резонатора, розміри якого вважаємо малими порівняно з довжиною хвилі та геометричними розмірами хвилеводу. При намагніченості фериту до насичення однорідним магнітним полем і малих розмірах резонатора намагніченість останнього по об'єму також буде однорідна, і його можна розглядати як випромінюючий магнітний диполь з еквівалентними магнітними струмами

$$i_x^m = j\omega\mu_0 m_x; \quad i_z^m = j\omega\mu_0 m_z, \quad (4)$$

де m_x, m_z — складові змінної намагніченості фериту вздовж осей x, z прямокутної системи координат.

Поля перевипромінювання, збуджувані змінною намагніченістю феритового резонатора, знайдемо, користуючись методом Вайнштейна [1]. У випадку узгодження хвилеводу поля перевипромінювання можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} \vec{E}_n &= \Sigma (C_s \vec{E}_s + C_{-s} \vec{E}_{-s}); \\ \vec{H}_n &= \Sigma (C_s \vec{H}_s + C_{-s} \vec{H}_{-s}), \end{aligned} \quad (5)$$

де $C_{\pm s}$ — амплітуди полів перевипромінювання, а $\vec{E}_{\pm s}, \vec{H}_{\pm s}$ — власні хвилі хвилеводу. Індекс s позначає тип хвилі, а його знак — напрям поширення. Обмежившись розглядом одномодального хвилеводу, вирази полів перевипромінювання шукатимемо у вигляді полів основного типу хвилі без врахування вищих типів хвиль, які вважаємо затухаючими.

Амплітуди полів перевипромінювання через еквівалентні магнітні струми знайдемо з виразів

$$C_{\pm 1} = -\frac{1}{N_1} \int_{v_\Phi} \vec{H}_{\mp 1} \vec{i}^m dv, \quad (6)$$

де N_1 — нормуючий множник

$$N_1 = \int_{S_\Pi} \{[\vec{E}_1 \vec{H}_{-1}] - [\vec{E}_{-1} \vec{H}_1]\} \vec{i} dS. \quad (7)$$

Складові електричних та магнітних полів хвилі типу H_{11} круглого хвилеводу запишемо у вигляді

$$\begin{aligned} E_{\pm 1,r} &= \mp Z^H H_{1,r,\alpha}; \\ E_{\pm 1,\alpha} &= \mp Z^H H_{1,r}; \\ H_{\pm 1,r} &= + J_1'(\beta_r r) \cos \alpha e^{\mp i \beta_z z}; \\ H_{\pm 1,\alpha} &= -\frac{1}{\beta_r r} J_1'(\beta_r r) \sin \alpha e^{\mp i \beta_z z}; \\ H_{\pm 1,z} &= \mp j \frac{\lambda_{\text{хв}}}{\lambda_{\text{кр}}} J_1(\beta_r r) \cos \alpha e^{\mp i \beta_z z}, \end{aligned} \quad (8)$$

де $\beta_z = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{хв}}}$ — поздовжнє хвильове число;

$\beta_r = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{кр}}}$ — поперечне хвильове число;

$Z^H = \frac{\omega \mu_0}{\beta_z}$ — хвильовий опір хвилеводу;

$\lambda_{\text{хв}}$ — довжина хвилі в хвилеводі;

$\lambda_{\text{кр}} = 3,413R$;

R — внутрішній радіус хвилеводу.

Підставляючи (4) і (7) в (6), одержимо

$$C_{\pm 1} = j \frac{8,4v_\Phi}{R^2 \lambda_{\text{хв}}} \vec{m} \vec{H}_{\mp 1}. \quad (9)$$

Зв'язок між змінною намагніченістю фериту і амплітудами мікрохвильового магнітного поля знайдемо, користуючись тензором магнітної сприйнятливості,

$$\vec{\chi} = \begin{vmatrix} \chi & -jk & 0 \\ jk & \chi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (10)$$

Використовуючи (8)–(10) з врахуванням того, що $\chi \approx -k$ [3], одержимо

$$C_{+1} = -j \frac{8,4v_\Phi \chi}{R^2 \lambda_{\text{хв}}} \left[J_1'(\beta_r r_0) + \frac{\lambda_{\text{хв}}}{\lambda_{\text{кр}}} J_1(\beta_r r_0) \right]^2 \cos^2 \alpha_0; \quad (11)$$

$$C_{-1} = j \frac{8,4v_\Phi \chi}{R^2 \lambda_{\text{хв}}} \left[J_1'^2(\beta_r r_0) - \left(\frac{\lambda_{\text{хв}}}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^2 J_1^2(\beta_r r_0) \right] \cos^2 \alpha_0.$$

Тепер неважко обчислити спочатку потужності, які поглинаються та перевипромінюються резонатором [1—3], а потім і коефіцієнти зв'язку [7] феритового резонатора з узгодженим круглим хвилеводом

$$K_2 = \frac{4,2v_{\text{фхр}}''}{R^2\lambda_{\text{хв}}} \left[J_1'(\beta r r_0) \mp \frac{\lambda_{\text{хв}}}{\lambda_{\text{кр}}} J_1(\beta r r_0) \right]^2 \cos^2 \alpha_0. \quad (12)$$

Характеристики взаємодії феритового резонатора з узгодженим круглим хвилеводом можна знайти за відповідними формулами, наведеними в [7, 8]. Для цього необхідно обчислити коефіцієнти зв'язку резонатора з хвилеводом згідно з виразами (12) і підстави-

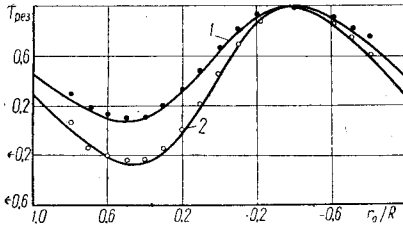


Рис. 2. Залежність коефіцієнта проходження при резонансі від координати розміщення феритового резонатора в круглому хвилеводі при $2R = 25$ мм, $f = 9$ Гц (точками показані наслідки експерименту):

- 1 — $v_{\text{ф}} = 1,1$ мм²; $\chi_{\text{р}}' = 2150$;
2 — $v_{\text{ф}} = 2$ мм²; $\chi_{\text{р}}' = 2460$.

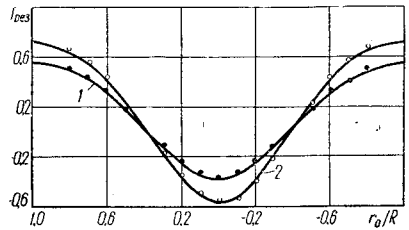


Рис. 3. Залежність коефіцієнта відбиття при резонансі від координати розміщення феритового резонатора в круглому хвилеводі за тих же даних, що й на рис. 2.

ти одержані величини до відповідних формул для характеристик взаємодії, наведених у вказаних роботах. Так, на рис. 2 і 3 показані обчислені таким чином та перевірені експериментально залежності коефіцієнтів проходження і відбиття при резонансі від координат розміщення феритового резонатора кулеподібної форми вздовж лінії $\alpha_0 = 0$, $\alpha_0 = \pi$. Як видно, зв'язок резонатора 1 з хвилеводом менший від критичного, а резонатора 2 — більший від критичного значення. Коефіцієнт відбиття в точках з круговою поляризацією мікрохвильового магнітного поля дорівнює нулю, а в решті точок збільшується із зростанням величини зв'язку.

На рис. 4, 5 показані амплітудно-частотні та фазо-частотні характеристики коефіцієнта проходження при розміщенні феритового резонатора в точках з круговою та лінійною поляризацією мікрохвильового магнітного поля. Як видно, при розміщенні резонатора в круговій поляризації зміна фазового кута коефіцієнта проходження в області феромагнітного резонансу дорівнює 2π (зв'язок резонатора з хвилеводом більший від критичного значення).

Для короткозамкненого круглого хвильоводу амплітуду пере-
випромінюваного поля можна записати у вигляді [1]

$$C = C_{-1} + C_{+1}e^{-j2\beta_z z_0}, \quad (13)$$

де z_0 — відстань від резонатора до короткозамкненої стінки.

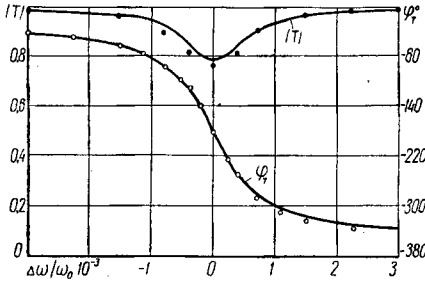


Рис. 4. Амплітудно-частотна та фазо-
частотна характеристики коефіцієнта
проходження для феритового резона-
тора (точками показані наслідки експе-
рименту):

$$v_\Phi = 6 \text{ мм}^2; \chi_p' = 4050 \text{ при } r_0 = 4,75 \text{ мм}; \\ \alpha_0 = 0; 2R = 25 \text{ мм}; f = 9 \text{ Гц}.$$

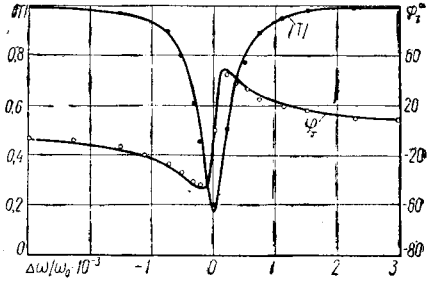


Рис. 5. Амплітудно-частотна та фазо-
частотна характеристики коефіцієнта
проходження для феритового резона-
тора (точками показані наслідки експе-
рименту):

$$v_\Phi = 6 \text{ мм}^2; \chi_p' = 4050 \text{ при } r_0 = 0; \\ 2R = 25 \text{ мм}; f = 9 \text{ Гц}.$$

Виконавши аналогічні розрахунки з врахуванням того, що в да-
ному випадку резонатор перебуває в полі стоячої хвилі,

$$H_x = 2J_1'(\beta_r r_0) \cos \alpha_0 \cos \beta_z z_0 e^{-j\beta_z z_0}, \\ H_z = 2 \frac{\lambda_{\text{ХВ}}}{\lambda_{\text{КР}}} J_1(\beta_r r_0) \cos \alpha_0 \sin \beta_z z_0 e^{-j\beta_z z_0}, \quad (14)$$

неважко одержати спочатку

$$C = j \frac{33,6v_\Phi \chi_p''}{R^2 \lambda_{\text{ХВ}}} \left[J_1'^2(\beta_r r_0) \cos^2 \beta_z z_0 + \left(\frac{\lambda_{\text{ХВ}}}{\lambda_{\text{КР}}} \right)^2 J_1^2(\beta_r r_0) \sin^2 \beta_z z_0 \right] \cos^2 \alpha_0, \quad (15)$$

а потім коефіцієнт зв'язку феритового резонатора з короткозамк-
неним круглим хвильоводом

$$K = \frac{16,8v_\Phi \chi_p''}{R^2 \lambda_{\text{ХВ}}} \left[J_1'^2(\beta_r r_0) \cos^2 \beta_z z_0 + \left(\frac{\lambda_{\text{ХВ}}}{\lambda_{\text{КР}}} \right)^2 J_1^2(\beta_r r_0) \sin^2 \beta_z z_0 \right] \cos^2 \alpha_0. \quad (16)$$

Характеристики взаємодії феритового резонатора з коротко-
замкненим круглим хвильоводом неважко обчислити за відповід-
ними формулами робіт [7, 8]. Наприклад, на рис. 6 показана виз-
начена таким чином та експериментально перевірена залежність
коефіцієнта відбиття при резонансі від відстані z_0 між резонатором
і короткозамкненою стінкою. Як видно, коефіцієнт відбиття дорів-

нює нулю при зв'язку резонатора з хвилеводом, що дорівнює критичному. Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики коефіцієнта відбиття аналогічні відповідним характеристикам коефіцієнта проходження при розміщенні феритового резонатора в круговій поляризації мікрохвильового магнітного поля.

Зауважимо, що при зміщенні феритового резонатора з лінії $\alpha_0 = 0$, $\alpha_0 = \pi$ площина поляризації основного типу хвилі H_{11}

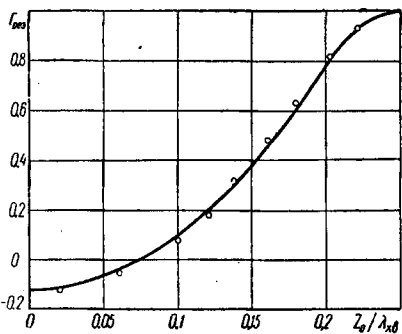


Рис. 6. Залежність коефіцієнта відбиття при резонансі від відстані між феритовим резонатором і короткозамикаючою стінкою при тих же даних, що й рис. 5 (точками показані наслідки експерименту).

а й через хвилю, площина поляризації якої перпендикулярна до площини поляризації падаючої електромагнітної хвилі. Суперпозиція падаючої та перевипромінюваної хвиль і визначає поляризацію хвилі, що проходить у напрямі до навантаження узгодженого круглого хвилеводу.

Наслідки дослідження поляризаційних явищ будуть опубліковані у наступних роботах.

ЛИТЕРАТУРА

1. В а й н ш т е й н Л. А., Электромагнитные волны, «Советское радио», 1957.
2. Г у р е в и ч А. Г., Ферритовый эллипсоид в волноводе, Радиотехника и электроника, 1963, 8, № 5.
3. М и к а э л я н А. Л., К о б л о в а М. М., Передача энергии в скрещенных волноводах при помощи намагниченного феррита, Радиотехника и электроника, 1962, 7, № 10.
4. К и с л я к о в с к и й А. В., В у н т е с м е р и В. С., Фазовые соотношения при взаимодействии ферритового сфероида с электромагнитным полем волновода, Известия вузов СССР.— Радиотехника, 1965, № 4.
5. М а с л е н н и к о в а В. В., Ферритовая сфера в коаксиальном волноводе, Радиотехника и электроника, 1964, 9, № 4.

6. Ильченко М. Е., Намагниченный ферритовый сфероид в коаксиальной линии, Вестник КПИ, № 2, серия радиотехники, Изд-во КГУ, 1965.

7. Ильченко М. Ю., Кудінов Є. В., Характеристики взаємодії намагніченого феритового елемента з лінією передачі НВЧ, Вісник КПИ, № 3, серія радіотехніки, Вид-во КДУ, 1966.

8. Ильченко М. Ю., Кудінов Є. В., Про характеристики взаємодії феритового резонатора з лінією передачі НВЧ, Вісник КПИ, № 4, серія радіотехніки, Вид-во КДУ, 1967.

M. E. ILTCHENKO

THE INVESTIGATION OF SOME INTERACTION CHARACTERISTICS OF
SYSTEM: ROUND WAVEGUIDE—FERRITE RESONATOR

S u m m a r y

The expressions for reradiations fields of ferrite resonator by the method of supporting currents are found. These expressions are used for finding coupling coefficients of ferrite resonator with waveguide.

The expressions for interection characteristic of this coupling system are obtained. The experimental acknowledgement of the theoretical results are given.