

## ФЕРИТОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ ДЛЯ СЕЛЕКТИВНИХ НВЧ ВАТМЕТРІВ ОДНОМОДОВОЇ ПОТУЖНОСТІ

<sup>1</sup> Вінницький національний технічний університет

### *Анотація*

*У роботі представлені результати математичного моделювання коефіцієнтів пропускання і відбиття прямокутного хвилеводу з феритовим зондом для селективних НВЧ ватметрів одномодової потужності. Математичне моделювання проведено для випадку поширення трьох нижніх типів хвиль при багатомодовій роботі прямокутного хвилеводу.*

**Ключові слова:** прямокутний хвилевод, феритовий зонд, одномодовий режим, ватметр, енергія хвиль.

### *Abstract*

*The paper presents the results of mathematical modeling of the transmission and reflection coefficients of a right-angle waveguide with a ferrite probe for selective microwave wattmeters of single-mode power. Mathematical modeling is carried out for the case of propagation of the three lower types of waves during multimode operation of a rectangular waveguide.*

**Keywords:** rectangular waveguide, ferrite probe, single-mode, wattmeter, wave energy.

### **Вступ**

На даний час існує цілий ряд приладів і пристроїв НВЧ, що використовують явище феромагнітного резонансу: перестроюванні твердотільні НВЧ генератори на основі лавинно-пролітних діодів і діодів Ганна, селективні вимірювачі НВЧ потужності, феритові смугові фільтри та ін [1]. У таких приладах застосовується лише властивості однорідної прецесії феромагнітного резонансу, в той час як виникнення резонансів неоднорідних типів прецесії (особливо в одномодовому режимі) може суттєво впливати на їхню роботу, внаслідок чого параметри та характеристики цих приладів або пристроїв виходять за межі заданих значень [2]. Дослідження феритового зонду для вибірних НВЧ ватметрів одномодової потужності, що використовує явище резонансного поглинання НВЧ енергії в феритовій кулі, є перспективними [3]. 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 [1]. Існуючі методи дослідження феритових зондів для вибірних НВЧ ватметрів одномодової потужності, основані на одномодових спрямованих відгалужувачах потужності, поперечному і поздовжньому зондуванні з наступною обробкою даних за допомогою математичного апарату перетворення Фур'є, мають суттєві недоліки. Одномодові НВЧ ватметри досліджуються за допомогою феритових зондів виходячи з припущення про наявність не більш ніж чітко обумовленої кількості типів електромагнітних хвиль [2]. 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 [3].

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

Метою роботи є модельне дослідження феритового перетворювача енергії електромагнітних хвиль для селективних НВЧ ватметрів одномодової потужності.

## Результати дослідження

У прямокутному хвилеводі з розмірами  $a \times b$  знаходиться ізотропний феритовий зонд сферичної форми (мала феритова куля) радіусом  $r_0$  (рис. 1) [4].

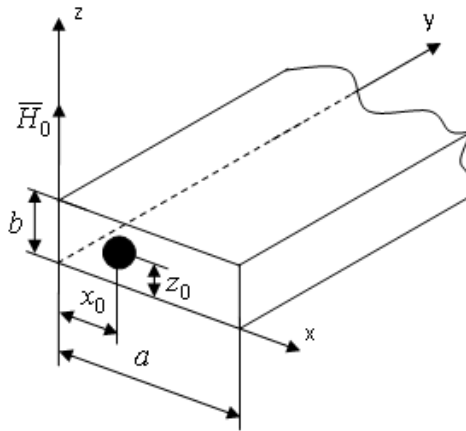
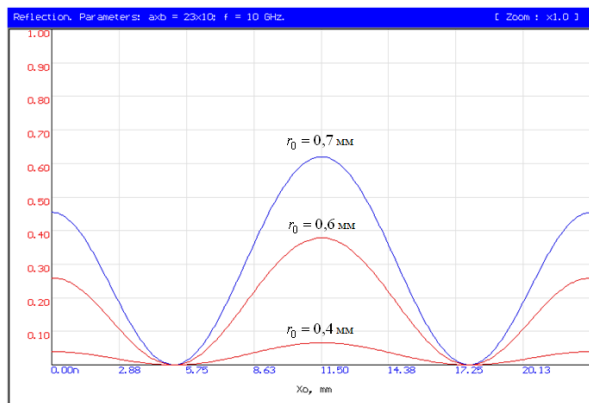


Рис. 1. Феритовий зонд сферичної форми в прямокутному хвилеводі

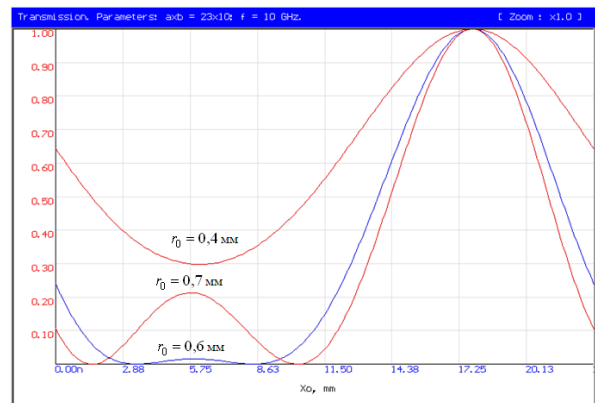
Електромагнітні коливання поширюються в напрямку осі  $y$ . Постійне підмагнічуюче поле  $H_0$  спрямоване по осі  $z$ . Відповідно до введеної системи координат (рис. 1) феритова куля має координати  $x_0, y_0, z_0$ . Радіус феритової сфери задовольняє умові  $kr_0 \ll 1$ , де  $k$  – стала поширення. Тобто радіус кулі набагато менший довжини хвилі, яка поширюється в хвилеводі, що дозволяє знехтувати взаємодією обміну і вирішувати задачу в магнітостатичному наближенні [5, 6].

У роботі проведено моделювання коефіцієнтів передачі і відбиття прямокутного хвилеводу з феритовим зондом для таких значень параметрів хвилеводу та феритового зонду:  $a \times b = 23 \times 10$  мм;  $f = 10$  ГГц;  $4\pi M_0 = 1780$  Гс;  $\Delta H = 0.8E$ ;  $z_0 = b/2$  [7].

Як видно з рис. 2,а, зміна радіуса феритового зонду не приводить до якісних змін залежності коефіцієнта відбиття від положення феритового зонду в хвилеводі, а змінюються лише максимальні значення. Більшим значенням радіуса феритового зонду відповідають більші значення коефіцієнта відбиття [7].



(а)



(б)

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

Коефіцієнт передачі в точці хвилеводу  $x_0 \approx a/4$  (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  $4\pi M_0$  ( $r_0 = 0,6$  мм). Порівнявши 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. Тому попередньо зроблені відповідні коментарі в тій же мірі справедливі і для залежності рис. 3,а [7].

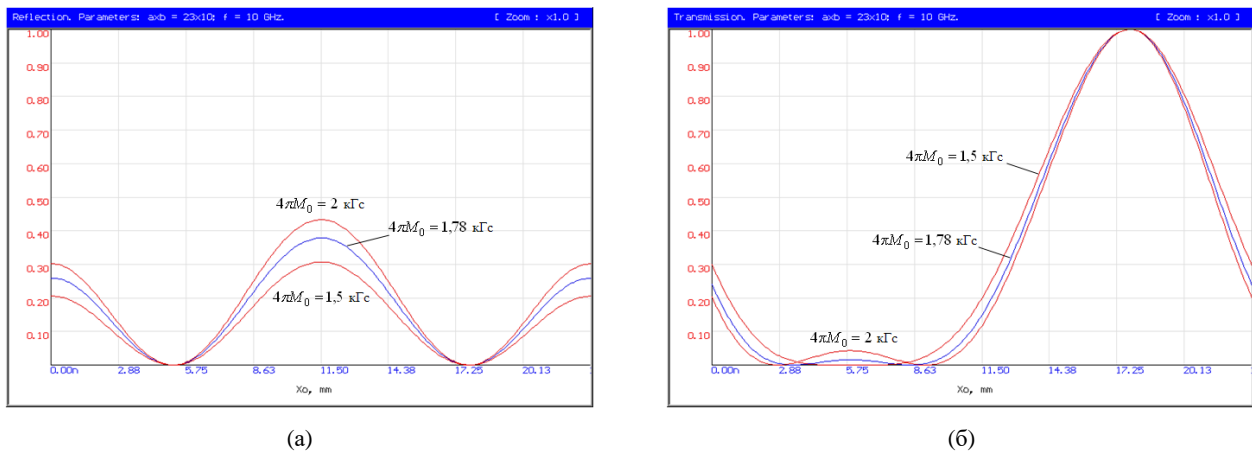


Рис. 3. Графіки залежностей коефіцієнтів відбиття (а) і передачі (б) від постійної намагніченості та координати феритового зонду в хвилеводі

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 [7].

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  $0,8E$ , відбувається різке збільшення коефіцієнта передачі в точці хвилеводу  $x_0 = a/4$ .

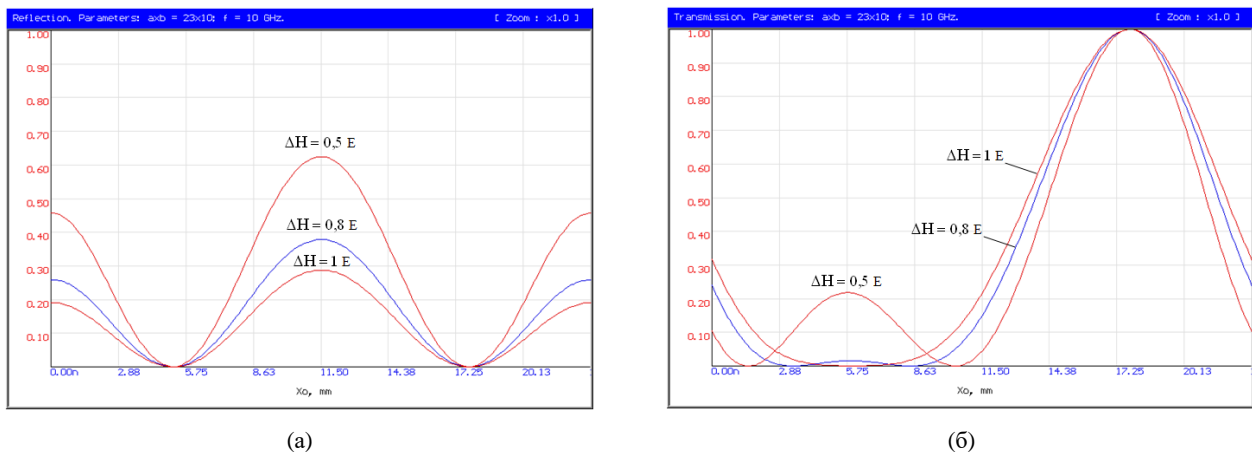


Рис. 4. Графіки залежностей коефіцієнтів відбиття (а) і передачі (б) від напівширини резонансної кривої та координати феритового зонду в хвилеводі

Залежності на рис. 2,а – рис. 4,б досліджувалися в одномодовому режимі, коли в прямокутному хвилеводі присутня лише хвиля типу  $H_{10}$ .

## Висновки

Використано відому математичну модель для опису хвильових процесів одномодового та багатомодового режимів роботи прямокутного хвилеводу з феритовим зондом сферичної форми. Отримано результати моделювання коефіцієнтів передачі і відбиття прямокутного хвилеводу з феритовим зондом сферичної форми для випадку одномодового режиму. Встановлено, що зміна радіуса феритового зонду сферичної форми не викликає змін коефіцієнта відбиття в залежності від положення цього феритового зонду у хвилеводі. При цьому змінюється лише чисельні значення піків кривої на графіку. Чим більше радіус, тим більші коефіцієнти відбиття. Також була досліджена залежність коефіцієнтів передачі та відбиття від різних значень півширини резонансної кривої. Показано, що коефіцієнт пропускання слабо залежить від постійної намагніченості. Використана математична модель адекватна при поширенні не більше 3-х молодших типів магнітних хвиль прямокутним хвилеводом стандартного перерізу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. K. A. Alhassoon, Y. Malallah, A. S. Daryoush Complex Permittivity and Permeability Extraction of Ferromagnetic Materials For Magnetically Tuned Microwave Circuits. *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 1, no. 2, pp. 639-645, Spring 2021, doi: 10.1109/JMW.2021.3065018.
2. Y. Zhang et al. Nonreciprocal Isolating Bandpass Filter With Enhanced Isolation Using Metallized Ferrite. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, no. 12, pp. 5307-5316, Dec. 2020, doi: 10.1109/TMTT.2020.3030784.
3. Vuntmeri V.S. Electrodynamic system effect on the ferrite resonator parameters. in *Izvestiya VUZ: Radioelektronika*, vol. 35, is. 3, March 1992, pp. 9-17.
4. R. G. Geyer, J. Baker-Jarvis. Microwave characterization of ferrites. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1992 Digest*, 1992, pp. 2259 vol.4, doi: 10.1109/APS.1992.221407.
5. Семенов А.О., Семенова О.О., Возняк О.М., Коваль К.О. Дослідження НВЧ феритового резонатора для вимірювання потужності багатомодового режиму прямокутного хвилеводу. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2013. №3. Тематичний випуск. С. 135-139.
6. Семенов А.О., Семенова О.О., Шутило М.А., Луцький Є.Ф., Зубарев О.В. Моделювання коефіцієнтів передачі і відбиття прямокутного хвилеводу з феритовим зондом вибірних НВЧ вагметрів. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2013. №3. С. 87-92.
7. Andriy Semenov, Dmytro Havrilov, Andrii Volovyk, Oleksandr Stalchenko, Roman Kulas, Dmytro Ilchuk. Single-Mode and Multimode Operation of the Rectangular Waveguide with a Spherical Ferrite Probe. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 26-28 Aug. 2021, pp. 100-104, doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575750.

**Семенов Андрій Олександрович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [semenov.a.o@vntu.edu.ua](mailto:semenov.a.o@vntu.edu.ua)

**Дектярьов Артур Юрійович** — студент групи РТ-22м, кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [arturdekktiarov@gmail.com](mailto:arturdekktiarov@gmail.com)

**Ольхович Владислав Миколайович** — студент групи РТ-22м, кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [olhovuch.vlad@gmail.com](mailto:olhovuch.vlad@gmail.com)

**Педос Максим Андрійович** — студент групи РТ-22м, кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [pedos636@gmail.com](mailto:pedos636@gmail.com)

**Semenov Andriy Oleksandrovych** — Dr. Sc. (Eng.), Full Professor, Professor of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [semenov.a.o@vntu.edu.ua](mailto:semenov.a.o@vntu.edu.ua)

**Dektyarev Artur Yuriyovych** — student of group RT-22m, Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [arturdekktiarov@gmail.com](mailto:arturdekktiarov@gmail.com)

**Olkhovich Vladyslav Mykolayovych** — student of group RT-22m, Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [olhovuch.vlad@gmail.com](mailto:olhovuch.vlad@gmail.com)

**Pedos Maksym Andriyovych** — student of group RT-22m, Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [pedos636@gmail.com](mailto:pedos636@gmail.com)