

УДК.537.87

ТОНКОДРОТЯНИЙ ЕЛЕМЕНТ ЗВ'ЯЗКУ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄМІВ

Н.К. Блинова, Л.П. Яцук, А.В. Селютин, А.О. Вусик

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, факультет РБЭС.

пл. Свободи 4, Харків, 61077, Україна

E-mail: Blinova@karazin.ua, yatsuk38@gmail.com

Надійшла до редакції 3 квітня 2018 р.

Одержано розв'язок електродинамічної задачі розсіяння на дротяному елементі зв'язку прямокутного хвилеводу з вільним напівпростором. Відрізок тонкого дроту через круглий отвір пронизує широку стінку хвилеводу і проходить без контакту з нею у вільний напівпростір. Хвилевід збуджується основною хвилею. Розрахунки амплітудного розподілу струму вздовж ідеально провідного дроту проведено з урахуванням п'яти просторових гармонік. Отримано коефіцієнти відбиття, проходження та випромінювання. Проведено експериментальні дослідження енергетичних характеристик такого елементу зв'язку та порівняння їх з результатами розрахунку. Показано, що узгодження результатів розрахунку і експерименту забезпечено у межах 10%. Показано, що цей елемент зв'язку може передавати у суміжний простір до половини потужності хвилі, що падає, при коефіцієнті відбиття не вище 0,15.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: дротяний елемент зв'язку, прямокутний хвилевід, коефіцієнт відбиття, коефіцієнт проходження, коефіцієнт випромінювання

Получено решение электродинамической задачи рассеяния на проволочном элементе связи прямоугольного волновода со свободным полупространством. Отрезок тонкой проволоки через круглое отверстие пронизывает широкую стенку волновода и проходит без контакта с ней в свободное полупространство. Волновод возбуждается основной волной. Расчеты амплитудного распределения тока вдоль идеально проводящего провода проведен с учетом пяти пространственных гармоник. Получены коэффициенты отражения, прохождения и излучения. Проведены экспериментальные исследования энергетических характеристик такого элемента связи и сравнение их с результатами расчета. Показано, что согласование результатов расчета и эксперимента обеспечено в пределах 10%. Показано, что этот элемент связи может передавать в соседнее пространство до половины мощности падающей волны при коэффициенте отражения не выше 0,15.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: проволочный элемент связи, прямоугольный волновод, коэффициент отражения, коэффициент прохождения, коэффициент излучения

The solution of the electrodynamic problem of scattering on a wire element of connection a rectangular waveguide with free half-space is obtained. A piece of thin wire through a round hole pierces the wide wall of the waveguide and passes into a free half-space without a contact with waveguide. Waveguide is excited by its fundamental mode. The calculations of the amplitude distribution of the current along the ideally conducting wire were carried out taking into account five spatial harmonics. The coefficients of reflection, transmission and radiation are received. Experimental studies of the energy characteristics of such an element of link and their comparison with the results of the calculation are carried out. It was shown that the agreement between the calculation results and the experimental ones was provided within 10%. It was shown that this coupling element can transmit up to half of the incident wave power to the neighboring space with a reflection coefficient not higher than 0.15.

KEY WORDS: wire bonding element, rectangular waveguide, reflection coefficient, transmission coefficient, coefficient of radiation

ВСТУП

У техніці надвисоких частот значну роль мають елементи зв'язку суміжних електродинамічних об'ємів. Найчастіше це щілинні і дротяні елементи зв'язку. Найбільш детально вивчені щілинні випромінювачі та елементи зв'язку у хвилеводних стінках. Фундаментальна теорія щілинних випромінювачів розроблена в [1]. Дротяні елементи зв'язку, які збуджуються власними хвилями і переносять потужність у сусідні електродинамічні об'єми, експериментально представлені в [2] та частково описані математично [3-4]. Такі з'єднувачі можуть мати різні застосування. Як випромінювачі, вони мають однорідну діаграму спрямованості у площині, ортогональній осі дротини. В якості елементів

зв'язку вони можуть з'єднувати непаралельні хвилеводи з довільним кутом між ними без будь-яких ускладнень геометричної структури. Важливо знати параметри розсіяння такої неоднорідності у хвилеводі. Метою дослідження є отримання коефіцієнтів відбиття, проходження та випромінювання тонкодротяного елемента зв'язку, одна частина якого розташована у хвилеводі, а інша – у вільному просторі.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглянута система показана на рис. 1. Тонкий відрізок ідеально провідного дроту довжини L та радіусу ρ проходить через маленький круглий отвір у широкій стінці нескінченного прямокутного хвилеводу. Радіус проводу на малюнку не показаний. Відстань від осі проводу до вузької хвилевідної стінки є x_0 . Товщина стінки дорівнює t , частина дроту всередині хвилеводу дорівнює l_1 , а за її межами – l_2 . Так $L = l_1 + l_2 + t$. Вісь проводу зміщена від початку координат x, y, z на відстань z_0 . Хвилевод збуджується домінуючою хвилею H_{10} одиничної амплітуди. Хвиля поширюється вздовж позитивного напрямку осі Z . Необхідно знайти розподіл амплітуди струму вздовж ідеально провідного дроту з урахуванням кількох гармонік, знайти коефіцієнти відбиття і проходження хвилі від дротяної неоднорідності.

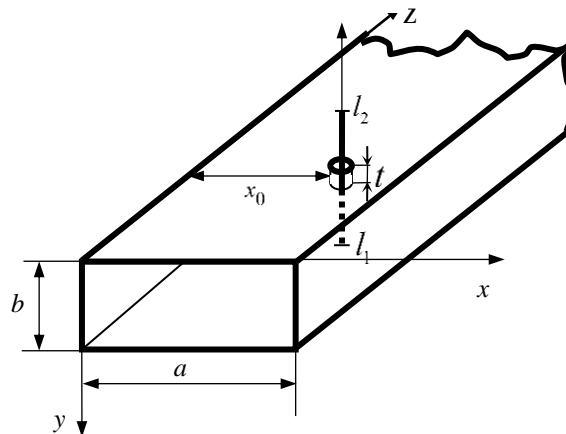


Рис.1. Геометрія системи

РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ

Електричне поле \vec{E} хвилі H_{10} наводить на поверхні дроту електричний струм з щільністю \vec{j}^e . Цей струм збуджує електромагнітне поле всередині і за межами хвилеводу (пізніше ми будемо використовувати індекси i і e для них). Амплітуди домінуючих хвиль, збуджених дротом, що розповсюджуються у напрямках $z < 0$ і $z > 0$, використовуються для пошуку коефіцієнтів відбиття та передачі.

У випадку одномодового режиму амплітуди $C^{(\pm 1)}$ домінуючих хвиль, що збуджуються всередині хвилеводу відрізком дроту, можуть бути знайдені згідно [1, 5]

$$C^{\pm 1} = 1/N_{\parallel} \int_V \vec{j}^e \vec{E}^{\mp 1} dV \quad (1)$$

Тут знаки в індексах пов'язані з напрямком розповсюдження: «+» відповідає напрямку $z > 0$ і знак «-» – напрямку $z < 0$, N_{\parallel} – нормуючий коефіцієнт [2], $\vec{E}^{\pm 1}$ – вектор-функція, що описує електричне поле домінуючої власної хвилі з одиничною амплітудою.

Інтегрування в (1) виконується вздовж частини вібратора, розташованої всередині хвилеводу. Змінна інтегрування може бути представлена як $dV = S dl$, де S і dl є елементи поперечного перетину вібратора та його довжини. Для практики становить інтерес випадок, коли вібратор тонкий, тому можна вважати поле $\vec{E}^{\pm 1} = const$ в зоні перетину вібратора. Крім того, враховуємо лише один компонент

щільності струму ($\vec{j}^e = \vec{\eta}^0 j_\eta$). Те саме стосується і повного струму. Через це вираз (1) в системі координат, показаний на рис.1, може бути переписаний наступним чином [3].

$$C^{(\pm 1)} = 1/N_1 \int_0^{l_1} J(\eta) E_y^{(\mp 1)}(x_0, \eta) d\eta \quad (2)$$

Струм $J^e \eta$, наведений на вібраторі, невідомий. Ми наближаємо щільність \vec{j}^e струму $J^e \eta$ набором власних функцій, що задовольняють однорідним граничним умовам Діріхле на кінцях інтервалу $0 \leftrightarrow L$.

$$\vec{j}^e(\eta) = \vec{y}^0 \sum_{q=1}^Q J_q \sin \frac{q\pi\eta}{L} \quad (3)$$

де J_q є невідомі амплітудні коефіцієнти.

Коефіцієнти J_q знаходимо з граничних умов на поверхні ідеально провідного дроту S .

$$E_y(\vec{j}^e) + E_y^0 \Big|_S = 0 \quad (4)$$

Тут $E_y(\vec{j}^e)$ – електричне поле, збуджене вібратором, E_y^0 це електричне поле вхідної хвилі, що збуджує вібратор. Поле E_y^0 на поверхні вібратора описується кусково- подібною функцією. У середині хвилеводу це є E_{y10} , проекція на вісь y вектора \vec{E} хвилі H_{10} , на останній частині інтервалу функція E_y^0 дорівнює нулю:

$$E_y^0 = \begin{cases} E_{y10} & 0 \leq \eta \leq l_1 \\ 0 & l_1 \leq \eta \leq L \end{cases} \quad (5)$$

Рівняння (4) є функціональним. Перетворимо його в систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), використовуючи метод Гальоркіна:

$$\sum_{q=1}^Q J_q Z_{pq}^i + Z_{pq}^e = U_p, \quad (6)$$

де $p = 1, 2, 3, \dots, Q$.

У виразі (6)

$$Z_{pq}^i = \frac{1}{4\pi i \omega \epsilon_a} \int_{l_1}^0 \sin \frac{p\pi\eta}{L} \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} + k^2 \right) \int_{l_1}^0 \sin \frac{q\pi\eta'}{L} G_{yy}^i(\vec{r} / \vec{r}') dy' dy \quad (7)$$

$$Z_{pq}^e = \frac{1}{4\pi i \omega \epsilon_a} \int_{-(t+l_2)}^{-(t+l_1)} \sin \frac{p\pi\eta}{L} \times \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} + k^2 \right) \int_{-t}^{-(t+l_1)} \sin \frac{q\pi\eta'}{L} G_{yy}^e(\vec{r} / \vec{r}') dy' dy \quad (8)$$

$$U_p = - \int_{l_1}^0 \sin \frac{p\pi\eta}{L} E_y^{st} dy. \quad (9)$$

Тут Z_{pq}^i, Z_{pq}^e – відповідно внутрішні та зовнішні власні взаємні імпеданси, U_p – індукована електрорушійна сила, G_{yy}^i є y -компонентою електричної тензорної функції Гріна прямокутного хвилеводу для векторного потенціалу, G_{yy}^e є функція Гріна вільного півпростору з однорідною граничною умовою Неймана на нескінченній ідеально провідній площині.

Після розв'язку СЛАР (6) визначимо коефіцієнт відбиття як

$$\dot{\Gamma}_1 = \sum_{q=1}^Q C_q^{-1} \quad (10)$$

і коефіцієнт передачі по хвилеводу як

$$\dot{\Gamma}_{12} = 1 + \sum_{q=1}^Q C_q^{+1} \quad (11)$$

Коефіцієнт випромінювання можна знайти з рівняння балансу потужності

$$|S_{\Sigma}|^2 = 1 - \left| \dot{\Gamma}_1 \right|^2 - \left| \dot{\Gamma}_{12} \right|^2 \quad (12)$$

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО АНАЛІЗУ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТОНКОДРОТЯНОГО ЕЛЕМЕНТА ЗВ'ЯЗКУ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄМІВ

За допомогою програми, написаної для використання у середовищі Mathcad, було проведено розрахунки амплітудного розподілу струму вздовж ідеально провідного дроту з урахуванням п'яти просторових гармонік. На рис.2, показано амплітудний розподіл струму вздовж дроту з урахуванням однієї гармоніки (крива 1) та з урахуванням п'яти гармонік (крива 2). Видно, що розподіл струму вздовж дроту з урахуванням п'яти гармонік не є симетричним.

В діапазоні частот були проведені розрахункові та експериментальні дослідження енергетичних характеристик неоднорідності у вигляді відрізка провідника різного діаметра, при різному зануренні його в хвилевід. На рис. 3 представлені експериментальні та розрахункові залежності від довжини l_1 енергетичних параметрів відрізка провідника довжиною $L = 16$ мм, діаметром $d = 1$ мм. Розрахунки проведені на частоті $f = 9,375$ ГГц.

Експериментальні криві позначені маркерами, розрахункові - не мають маркерів. На рисунку 3 відображені коефіцієнти проходження $|S_{12}|^2$ відповідно: крива 1 - експеримент та крива 2 - розрахунок, коефіцієнти відбиття $|S_{11}|^2$ відповідно: крива 3 - експеримент і крива 4 - розрахунок, коефіцієнти випромінювання $|S_{\Sigma}|^2$ отримані з рівняння енергетичного балансу, відповідно крива 5- експеримент і крива 6 - розрахунок.

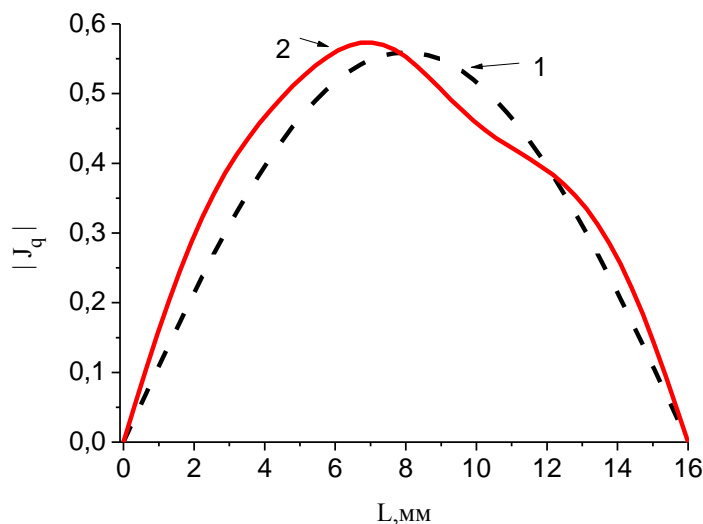


Рис. 2. Амплітудний розподіл струму вздовж ідеально провідного дроту з урахуванням просторових гармонік

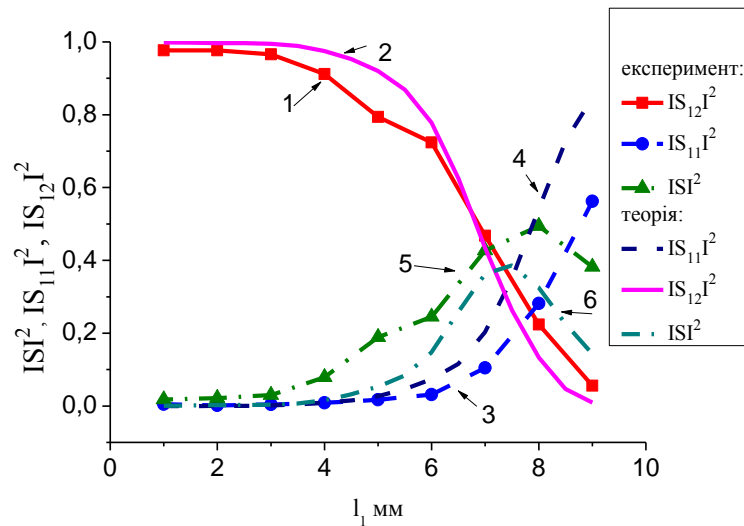


Рис. 3. Залежності енергетичних параметрів від l_1 на частоті 9,375 ГГц

Видно, що розрахунковий коефіцієнт відбиття вищий, ніж експериментальний при $l_1 > 5$ мм. Розрахунковий коефіцієнт випромінювання менший експериментальних значень при всіх значеннях $l_1 > 4$ мм.

Одна з причин різниці експериментальних і розрахункових кривих полягає в тому, що розрахунки проведені в припущенні нульового значення струму на кінці вібратора. Оскільки вібратор не надто тонкий, має місце затікання струму на торці. Через це струм на кінцях вібратора не дорівнює нулю. Можна уявити собі, що уявний вібратор, у якого струм на кінці дорівнює нулю, трохи довший реального, і струм на додатковій ділянці стає радіальним. Оцінити довжину цієї області і її внесок в загальне поле, створене вібратором поки не є можливим. Можна тільки знайти його емпірично.

Будемо виходити з того, що подовження вібратора не повинно перевищувати два радіусу вібратора (один знизу, другий зверху). При повній довжині вібратора $L = 16$ мм, $l_1 = 7$ мм і діаметрі $d = 1$ мм вибираємо довжину \hat{L} віртуального вібратора, що дорівнює 17 мм, $\hat{l}_1 = 7,4$ мм. Не залишилася незмінною і товщина вібратора. Зменшення діаметра вібратора позитивно позначилося на узгодженні розрахункових і експериментальних результатів.

Можливо, допущення, прийняті для тонкодротяної моделі, виявляються недостатньо справедливими при діаметрі вібратора $d = 1$ мм. Одним з цих припущень може бути довільність вибору твірної, на якій формулюється гранична умова. Тому розрахункові дані, отримані для більш тонкого вібратора, точніше описують фізичні процеси в даній системі, і краще узгоджуються з експериментальними даними. Візьмемо для розрахунків $\hat{d} = 0,6$ мм. На рис.4 представлені криві залежностей енергетичних коефіцієнтів від l_1 за умови, що $L = \hat{L}$, $d = \hat{d}$.

Видно, що результати розрахунків краще корелюють з експериментальними кривими, ніж на рис.3. Аналогічна закономірність проявляється при підборі ефективних довжин вібраторів та їх діаметрів для розрахунку енергетичних характеристик вібраторів меншого і більшого діаметру ($d = 0,6$ мм та $d = 1,5$ мм). При цьому виявилось, що узгодження результатів розрахунку та експерименту знаходяться в межах 10%.

Далі на рис.5 представлені експериментальні та розрахункові залежності від частоти енергетичних характеристик вібратора: коефіцієнти проходження, коефіцієнти відбиття, коефіцієнти випромінювання у випадку $L = 16$ мм, $d = 1$ мм, $l_1 = 7$ мм криві 1, 3, 5-експеримент та $\hat{L} = 17$ мм, $\hat{l}_1 = 7,4$ мм, $\hat{d}_r = 0,6$ мм обраних для розрахунку відповідно криві 2, 4, 6.

Видно гарний збіг результатів розрахунку і експерименту. Різниця спостерігається лише для коефіцієнта проходження в високочастотній області при $f > 9,5$ ГГц, що пояснюється тим, що в

розрахунках не враховувався отвір, який в експерименті на високих частотах впливає на енергетичні коефіцієнти більш суттєво, ніж на низьких частотах.

Виявилось також, що цей елемент зв'язку може передавати у суміжний простір до половини потужності первинної хвилі, що збуджує хвилевід, при коефіцієнті відбиття не вище 0,15.

На рис. 6 представлені результати експерименту і розрахунку того ж варіанту, що раніше (рисунок 5), але розрахунок проведено одним з чисельних методів (комерційна програма).

Експериментальні результати нанесені маркерами, розрахункові - суцільними лініями. Видно, що розрахунок таким способом дає найгірший збіг з експериментом, ніж наші розрахунки.

Розрахункові дані, отримані одним з чисельних методів комерційних програм, розходяться з результатами експерименту більше, ніж наші, як в області низьких, так і в області високих частот.

Показано, що вібратор, що проходить через невеликий круглий отвір в широкій стінці хвилеводу, ефективно передає енергію електромагнітного поля в суміжний електродинамічний об'єм.

Коефіцієнт випромінювання по потужності близький до половини падаючої потужності при низькому коефіцієнті відбиття на частотах близьких до резонансної.

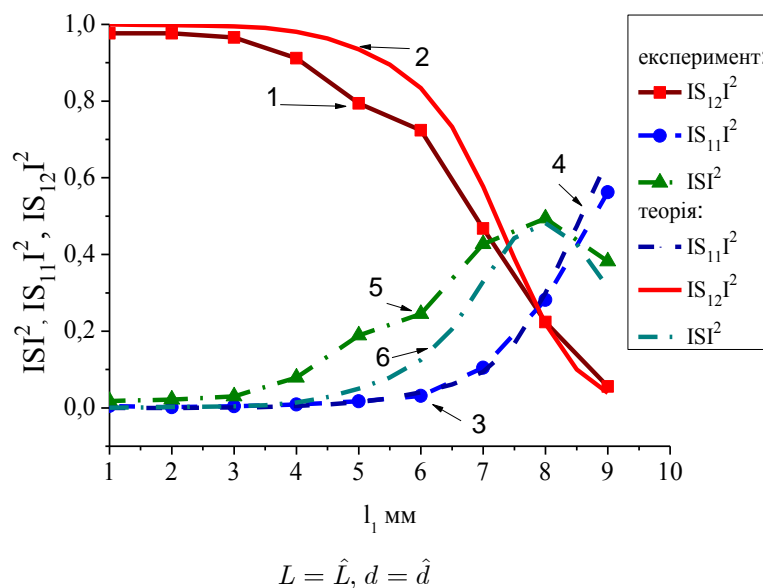


Рис. 4. Залежності енергетичних параметрів від l_1 на частоті 9,375 ГГц

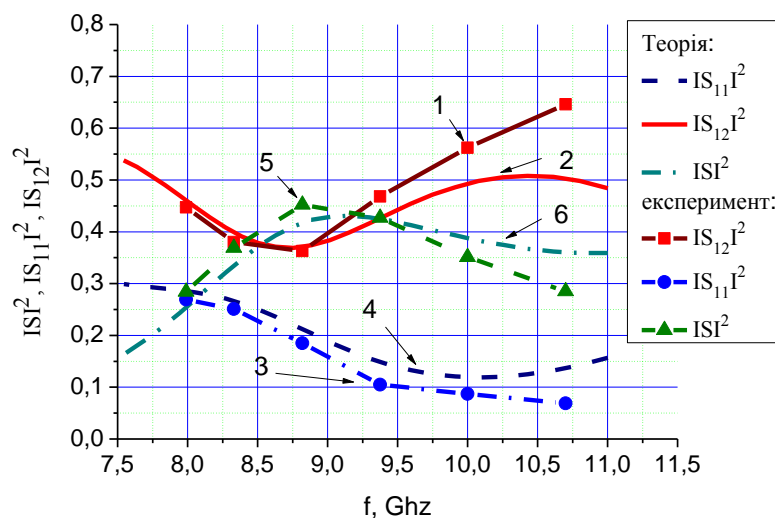
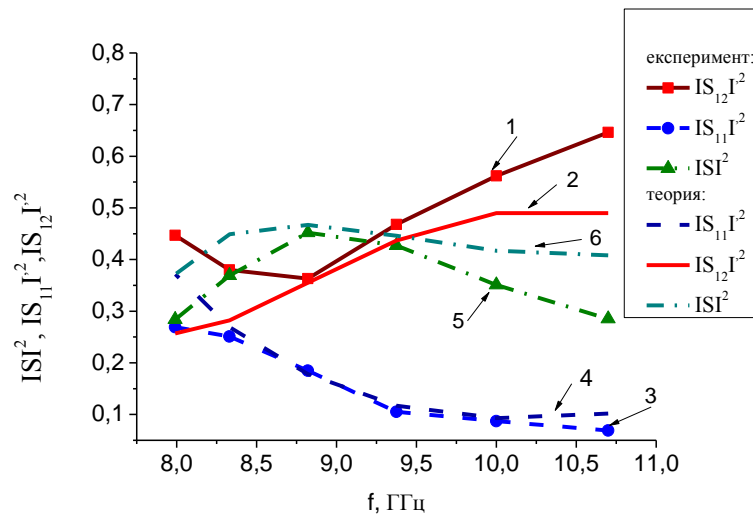


Рис. 5. Частотні залежності енергетичних параметрів при $d = 1$ мм, $l_1 = 7$ мм, $L = 16$ мм.



$$l_1 = 7 \text{ мм}, L = 16 \text{ мм}.$$

Рис. 6. Частотні залежності енергетичних параметрів при $d = 1$ мм.

ВИСНОВКИ

Таким чином, можна зробити висновок про те, що побудована математична модель зв'язку хвилеводу та вільного півпростору відрізком дроту через невеликий круглий отвір дозволяє розраховувати енергетичні параметри з урахуванням кількох базисних функцій. Емпіричні поправки для загальної довжини вібратора, його діаметра і частини довжини вібратора зануреної в хвилевід, забезпечують узгодження результатів розрахунку і експерименту в межах 10%. Виняток становить область високих частот, де проявляється вплив отвору через який проходить вібратор більше, ніж на низьких частотах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Фельд Я.Н., Бененсон Л.С. Антенно-фидерные устройства, ч. 2. – М.: Изд-во ВВИА им. Жуковского Н.Е. – 1959.– 551с.
2. Blinova N. K., Yatsuk L. P., Sachko V. O. Energy characteristics of wire vibrator connecting a rectangular waveguide and the free half space through a small hole // 9-th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW-2016), June 20-24. 2016. Proc. – Kharkiv, 2016.
3. Yatsuk L.P., Vusik A. A. Thin-wire coupling element of adjacent electrodynamic volumes // International Conference on Antenna Theory and Techniques, 16-20 September, 2013: Odessa, Ukraine 2013. – pp. 157-159.
4. Blinova N. K. On the Reliability of the Mathematical Model of Coupling the Waveguide and Free Half Space by a Wire Segment Through a Small Round Aperture / N. K. Blinova, L. P. Yatsuk, V. O. Sachko, A.V. Selutin // 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals Share this event (UWBUSIS 2016). Odessa, Ukrain, September 05-11. - 2016. : – Odessa, Ukraine, 2016. – P. 136-138.
5. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. –М.: Сов.радио, 1957. – 581с.