

Експериментальне дослідження впливу часткового діелектричного заповнення на електродинамічні характеристики та розміри прямокутного хвилеводу

Карашук Н. М.¹, Манойлов В. П.², Чухов В. В.², Герасименко В. В.³, Кондратов О. М.⁴, Ципоренко В. Г.², Ставісюк Р. Л.¹

¹Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, м.Житомир, Україна

²Державний університет «Житомирська політехніка», м.Житомир, Україна

³Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, м.Київ, Україна

⁴Науково-дослідний інститут Міністерства оборони України, м.Київ, Україна

E-mail: knm7@ukr.net

Представлено результати експериментального дослідження впливу часткового діелектричного заповнення (ЧДЗ) на електродинамічні характеристики та розміри прямокутного хвилеводу. Результати експериментального дослідження порівнюються із розрахунковими, отриманими за допомогою наближеного методу визначення ефективної діелектричної проникності та сталої поширення частково заповненого хвилеводу (ЧЗХ), представленого в [1]. Зокрема наводяться результати теоретичного розрахунку залежностей розміру широкої стінки ЧЗХ із розмірами поперечного перерізу 23×10 мм від коефіцієнта заповнення уздовж широкої стінки хвилеводу на частоті 10 ГГц, довжини хвилі, хвильового опору ЧЗХ та сталої поширення від коефіцієнта заповнення вздовж широкої стінки хвилеводу у смузі частот 6–14 ГГц для модифікацій ЧЗХ 2–1–2 (тонкі діелектричні пластини біля бокових стінок) та 1–2 (тонка діелектрична пластинка біля однієї бокової стінки) для хвилі типу H_{10} . Експериментальні дослідження проведено за допомогою лабораторної установки, яка складалась з генератора НВЧ сигналів, вимірювальної лінії (на базі прямокутного хвилеводу), металевого короткозамикача та вимірювача відношення напруг. Всередину прямокутного хвилеводу вимірювальної лінії встановлювались діелектричні пластини з фторопласту Ф4 шириною 10 мм, товщиною 2 мм та 4 мм, довжиною 25,3 см. Максимальна відносна похибка результатів експериментальних досліджень для модифікацій 2–1–2, 1–2 не перевищує 15%, зокрема для модифікації 2–1–2 вона менша ніж для 1–2. Отримані експериментальні результати підтвердили достатньо високу точність наближеного методу розрахунку ЧЗХ, наведеного у роботі [1].

Ключові слова: прямокутний хвилевід; часткове діелектричне заповнення; ефективна діелектрична проникність; стала поширення; електричні розміри

DOI: [10.20535/RADAP.2022.88.69-76](https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.88.69-76)

Вступ. Постановка проблеми

Порожністі металеві хвилеводи набули широкого поширення в основному через їх низькі погонні втрати та високу граничну потужність [2]. Проте характеристики частоти зрізу та громіздкість обмежують доцільність їхнього використання у деяких випадках. Зменшення поперечних розмірів прямокутного хвилеводу зменшує його середню потужність, смугу робочих частот, призводить до появи хвиль вищих типів [3]. Для усунення цих недоліків застосовують ряд конструктивних рішень, які залежать від призначення хвилеводу. Наприклад, двосторонні гофровані хвилеводи з діелектри-

чним заповненням для врахування зворотних типів хвиль, які можуть поширюватися нижче за частоту відсікання, використовують для виготовлення компактних фільтрів у системах зв'язку з метою уникнення інтерференції між різними смугами частот та фазообертачів – для керування випромінюванням апертурних антен радіолокаційних систем [2,4]. Прямокутні хвилеводи, що містять неоднорідні метаматеріали з градуйованими профілями показника заломлення, використовують у хвилевідних згинах, антенах з підсиленням випромінюванням [5]. Прямокутні хвилеводи із частковим діелектричним заповненням (ЧДЗ) використовують для вимірювання електромагнітних характеристик матеріалів з

високою точністю, для ширококутних пристроїв керування потужністю НВЧ, у системах зв'язку та РЛС як планарні решітки, в антенах з витікаючою хвилею та ін. [6–10].

Уповільнення хвилі у хвилеводі шляхом введення в нього діелектричного шару збільшує критичну довжину хвилі основного типу. Це дозволяє зменшити електричний поперечний розмір хвилеводу без зміни геометричного. Розв'язок електродинамічної задачі для частково заповненого хвилеводу (ЧЗХ) зводиться, у першу чергу, до пошуку сталої поширення [1]. Тому аналіз існуючих методів для визначення сталих поширення та полів у ЧЗХ актуальний.

1 Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розроблено декілька методів для визначення сталих поширення та полів у прямокутних хвилеводах із ЧДЗ [11, 12]. Наближені варіаційні методи, методи теорій збурень мають достатню складність обчислень та не завжди дають високу точність розрахунків [11]. Числові методи у таких прикладних програмних продуктах HFSS, COMSOL і CST, наприклад, не завжди ефективно обчислюють власні числа хвилеводів, що містять діелектрики зі змінним показником заломлення [8].

Простий наближений метод, представлений в [1], має прийнятну на практиці точність, не вимагає громіздких розрахунків для пошуку сталої поширення у прямокутному хвилеводі із ЧДЗ та хвилею типу H_{10} . Зокрема, отримано вираз [1] (23) для визначення ефективної діелектричної проникності, який містить множник заповнення для різних модифікацій ЧЗХ (з однією та двома діелектричними пластинами за їх довільного розташування, проникностей та розмірів). Проведено порівняння результатів розрахунків наближеним методом [1] із строгими розрахунками варіаційного методу. Досліджено вплив на розбіжність строгого та наближеного розв'язків збільшення діелектричної проникності пластин, коефіцієнта заповнення та електричного розміру ЧЗХ. Наведено значення максимальної відносної похибки наближеного розв'язку для різних модифікацій, діелектричної проникності та електричного розміру ЧЗХ. За наближеним методом [1] у [13] досліджено можливість використання часткового діелектричного заповнення для зміни електричних розмірів прямокутних хвилеводів. При цьому враховано основні модифікації часткового заповнення; розміри елементів діелектричного заповнення; відносну діелектричну проникність матеріалу; коефіцієнти заповнення хвилеводу уздовж осей [13]. Результати, отримані в [13], не суперечать відомим.

Проте в [1], [13] не наведено результатів експериментальних досліджень.

Метою статті є експериментальне дослідження впливу часткового діелектричного заповнення на електродинамічні характеристики та розміри прямокутного хвилеводу з їх подальшим порівнянням із результатами теоретичних розрахунків наближеним методом.

2 Виклад основного матеріалу

Оскільки хвилевід поперечно-неоднорідний, то вводиться ефективна діелектрична проникність середовища $\varepsilon_{\text{еф}}$, яка його заповнює, для розрахунку основних електродинамічних характеристик.

Зазвичай сталу поширення шукають у такий спосіб:

$$\gamma^2 = k^2 \varepsilon_{\text{еф}} - \chi^2, \quad (1)$$

де $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число вакууму; λ – довжина хвилі; χ – поперечне хвильове число. Для хвилі типу H_{10} $\chi = \pi/a$, де a – розмір широкої стінки прямокутного хвилеводу.

При цьому вираз для ефективної діелектричної проникності має вигляд [1]:

$$\varepsilon_{\text{еф}} = 1 + (\varepsilon_r - 1) \eta, \quad (2)$$

де η – множник заповнення.

У Табл. 1 наведено вигляд модифікацій ЧЗХ 2–1–2, 1–2 та значення множника заповнення η .

Тут коефіцієнт заповнення хвилеводу вздовж вузької стінки $t_y = 1$ ($t_y = d/b$, d – розмір діелектричної пластини вздовж вузької стінки хвилеводу; b – розмір вузької стінки хвилеводу).

Тоді довжина хвилі у хвилеводі, частково заповненому діелектриком буде дорівнювати:

$$\lambda_{\text{хв}} = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_{\text{еф}} - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}. \quad (3)$$

Критична довжина хвилі у хвилеводі з урахуванням ефективної діелектричної проникності [14]:

$$\lambda_{\text{кр}} = 2a\sqrt{\varepsilon_{\text{еф}}}. \quad (4)$$

При цьому розмір широкої стінки хвилеводу, пов'язаний з ефективною діелектричною проникністю, визначатиметься таким чином [14]:

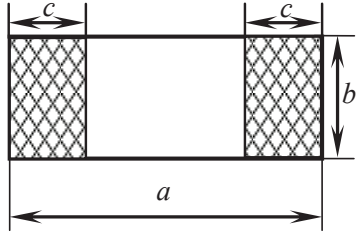
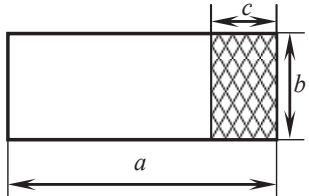
$$a = \frac{\lambda_{\text{кр}}}{2\sqrt{\varepsilon_{\text{еф}}}}. \quad (5)$$

Хвильовий опір прямокутного хвилеводу із частковим діелектричним заповненням визначається за формулою [14]:

$$Z_{\text{хв}} = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}}, \quad (6)$$

де $Z_0 = 377$ Ом – хвильовий опір вільного простору.

Табл. 1 Множник заповнення для різних модифікацій ЧЗХ

Модифікація ЧЗХ		
	2-1-2	1-2
		
η	$(1 - \text{sinc}\pi t_x) t_x$	$(1 - \text{sinc}2\pi t_x) t_x$
t_x	$2c/a$	c/a

2.1 Дослідження впливу часткового діелектричного заповнення на електродинамічні характеристики та розміри прямокутного хвилеводу

Отриманий вираз (5) дозволяє провести дослідження впливу коефіцієнта заповнення хвилеводу вздовж осі $x - t_x$ на зміну геометричних розмірів стандартного прямокутного хвилеводу 23×10 мм для хвилі типу H_{10} за відносної діелектричної проникності діелектрика ЧЗХ $\epsilon_r = 2$ для модифікацій ЧЗХ 2-1-2, 1-2, вигляд яких та значення множника заповнення η наведено у Табл. 1.

Графіки залежностей $a(t_x)$ для модифікацій 2-1-2, 1-2 при $\epsilon_r = 2$, $f = 10$ ГГц, побудовані за виразом (5), показано на Рис. 1.

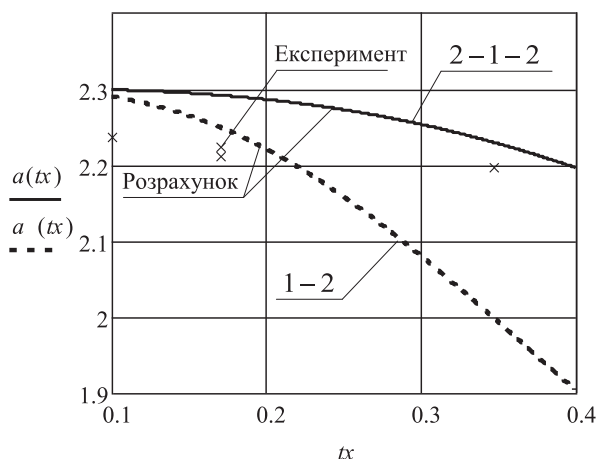


Рис. 1. Графіки залежностей $a(t_x)$ для модифікацій ЧЗХ 2-1-2 та 1-2 (a , см) при $\epsilon_r = 2$, $f = 10$ ГГц

При цьому, наприклад, розмір широкій стінки прямокутного хвилеводу для модифікації 2-1-2 становитиме: $a(0,174) = 2,29$ см, $a(0,348) = 2,228$ см, а для модифікації 1-2 - $a(0,0869) = 2,293$ см,

$a(0,174) = 2,246$ см. Звідси діапазон робочих частот хвилеводу для хвилі H_{10} становитиме 6-14 ГГц.

Графіки залежностей $\lambda_{xв}(f, t_x)$ для модифікації 2-1-2 при $t_x = 0,174$, $t_x = 0,348$ показано на Рис. 2, а на Рис. 3 - для модифікації 1-2 при $t_x = 0,0869$, $t_x = 0,174$. Графіки залежностей $Z_{xв}(f, t_x)$ для модифікації 2-1-2 при $t_x = 0,174$, $t_x = 0,348$, а також для модифікації 1-2 при $t_x = 0,0869$, $t_x = 0,174$ показано на Рис. 4. Графіки залежностей сталої поширення $\gamma(f, t_x)$ для модифікації 2-1-2 при $t_x = 0,174$, $t_x = 0,348$ показано на Рис. 5, а для модифікації 1-2 при $t_x = 0,0869$, $t_x = 0,174$ - показано на Рис. 6. Всі ці залежності отримано при $\epsilon_r = 2$, для стандартного прямокутного хвилеводу 23×10 мм та хвилі типу H_{10} .

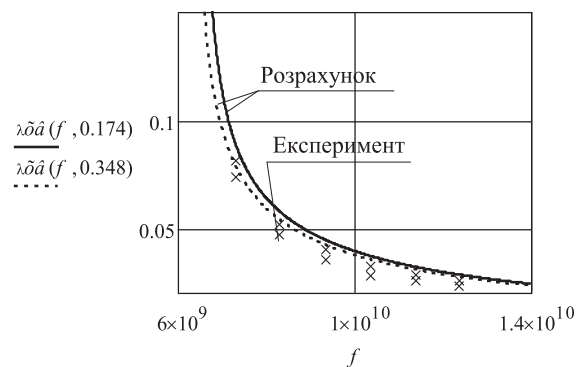


Рис. 2. Графіки залежностей $\lambda_{xв}(f, t_x)$ для модифікації ЧЗХ 2-1-2 у діапазоні частот 6-14 ГГц ($\lambda_{xв}$, м) при $\epsilon_r = 2$ та $t_x = 0,174$, $t_x = 0,348$

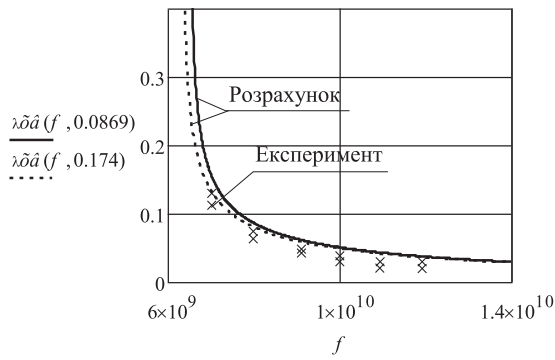


Рис. 3. Графіки залежностей $\lambda_{xv}(f, t_x)$ для модифікації ЧЗХ 1–2 у діапазоні частот 6–14 ГГц (λ_{xv} , м) при $\epsilon_r = 2$ та $t_x = 0,0869, t_x = 0,174$

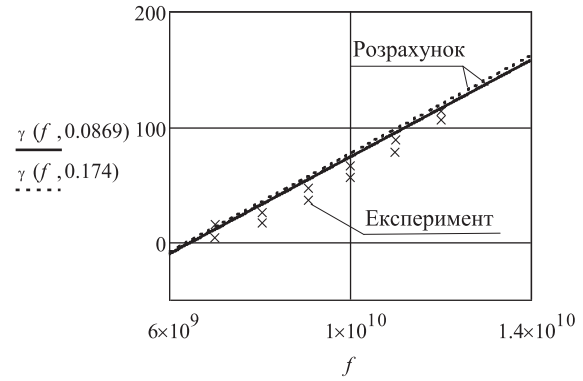


Рис. 6. Графіки залежностей $\gamma(f, t_x)$ за $\epsilon_r = 2$ та $t_x = 0,0869, t_x = 0,174$ для модифікації ЧЗХ 1–2 у діапазоні частот 6–14 ГГц

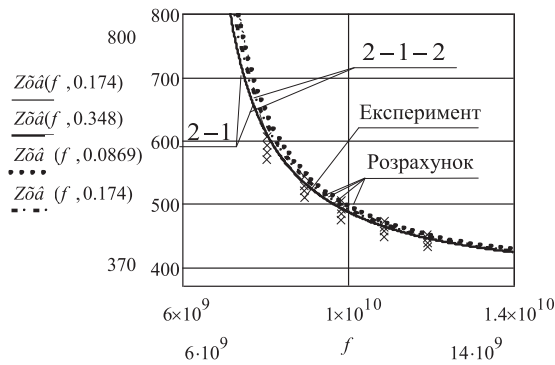


Рис. 4. Графіки залежностей $Z_{xv}(f, t_x)$ за $\epsilon_r = 2$ та $t_x = 0,174, t_x = 0,348$ для модифікації ЧЗХ 2–1–2 та $t_x = 0,0869, t_x = 0,174$ для модифікації ЧЗХ 1–2 у діапазоні частот 6–14 ГГц (Z_{xv} , Ом)

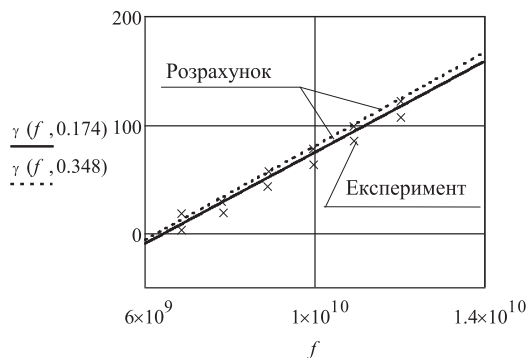


Рис. 5. Графіки залежностей $\gamma(f, t_x)$ за $\epsilon_r = 2$ та $t_x = 0,174, t_x = 0,348$ для модифікації ЧЗХ 2–1–2 у діапазоні частот 6–14 ГГц

2.2 Експериментальне дослідження впливу часткового діелектричного заповнення на електродинамічні характеристики та розміри прямокутного хвилеводу

Для експериментального дослідження прямокутного хвилеводу із ЧДЗ було використано вимірювальну установку, структурну схему та зовнішній вигляд якої зображено на Рис. 7.

З виходу генератора 1 через коаксіальний кабель, коаксіально-хвилевідний перехід 2, вентиль 3 електромагнітні коливання поступають на вхід вимірювальної лінії на базі прямокутного хвилеводу 5, до виходу якої приєднано короткозамикач 9. З виходу детектора 7 вимірювальної лінії сигнал надходить на вимірювач відношень напруг 8.

У прямокутний хвилевід вимірювальної лінії 5 розмірами 23×10 мм вставлено діелектричні пластини 10 (розміри кожної $253 \times 10 \times 2$ мм (Д \times Ш \times В)), виготовлені з фторопласту Ф4 із $\epsilon_r = 2$ [15] (Рис. 7).

Вимірюваною величиною є довжина хвилі у такому ЧДЗ.

Значення довжини хвилі в прямокутному хвилеводі розраховуємо як середнє арифметичне λ_{xve} за трьома вимірюваннями. За експериментально виміряними значеннями λ_{xve} будуються залежності $\lambda_{xve}(f)$ (Рис. 2, Рис. 3), з виразу (3) виводиться експериментальне значення ефективної діелектричної проникності $\epsilon_{efе}$, після підстановки якого у (5) знайдено експериментальні залежності $a_e(t_x)$ (Рис. 1), у (6) – $Z_{xve}(f, t_x)$ (Рис. 4), в (1) – $\gamma_e(f, t_x)$ (Рис. 5, Рис. 6).

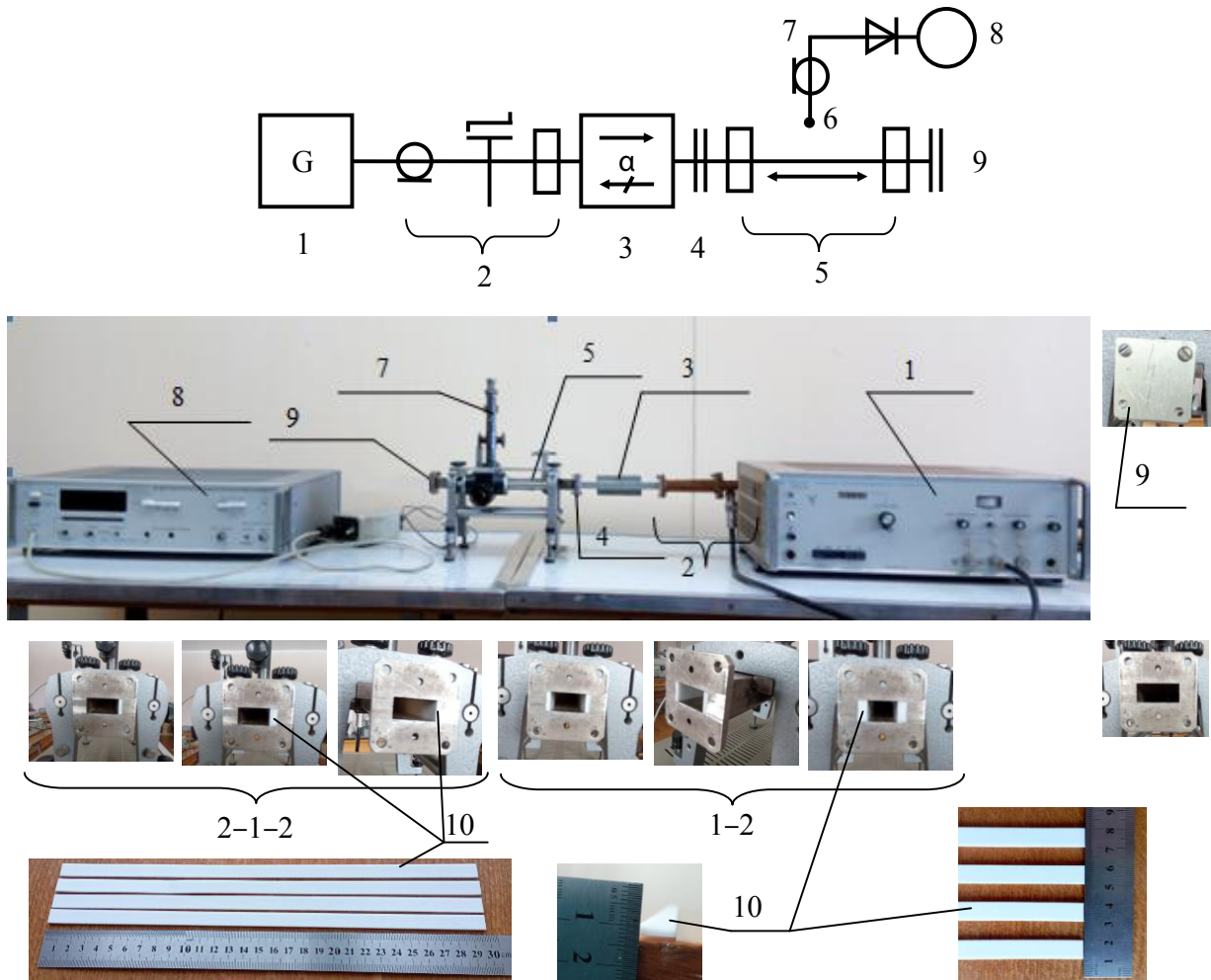


Рис. 7. Структурна схема та зовнішній вигляд вимірювальної установки для дослідження електродинамічних характеристик прямокутного хвильоводу із ЧДЗ

3 Аналіз отриманих даних

Зі збільшенням коефіцієнта заповнення t_x для двох модифікацій ЧЗХ довжина хвилі у хвильоводі зменшується (Рис. 2, Рис. 3). Це дозволяє змінювати електричний розмір прямокутного хвильоводу без зміни геометричного.

Результати порівняльного аналізу впливу модифікації ЧЗХ на зміну значення поперечного перерізу прямокутного хвильоводу $a \times b$ (Рис. 1) наведено у Табл. 2.

Як бачимо, у модифікації 2-1-2 діелектричні пластини розташовано у мінімумах електричного поля хвильоводу. Коли значення t_x мале, то пластини знаходяться у мінімумах електричного поля і практично не впливають на сталу поширення, поле спотворюється слабо. У такому разі розміри поперечного перерізу хвильоводу можна змінювати незначно. Зі збільшенням t_x діелектричні пластини поступово входять в область дії електричного поля, яке, відповідно до граничних умов, не має розриву. Це

збільшує вплив діелектрика, поле спотворюється, зміщується до пластин, майже повністю переходить у діелектрик. Цей діелектричний ефект спричиняє нелінійну залежність розмірів хвильоводу від коефіцієнта заповнення t_x . Зазначимо, що помітний вплив діелектричних пластин починається із критичного значення $t_x = 0,35$ (Рис. 1). Порівнюючи хвильоводи із однією діелектричною пластиною та двома, можна стверджувати, що для досягнення одного і того ж ефекту хвильовід із двома пластинами потребує майже в двічі більшого об'єму діелектрика.

Також зі збільшенням коефіцієнта заповнення t_x (Рис. 5, 6) стала поширення збільшується для обох розглядуваних модифікацій ЧЗХ. Це призводить до збільшення затухання повздовжньої та поперечних складових електромагнітного поля у хвильоводі, на що впливає також зменшення хвильового опору (Рис. 4). У випадку $f = f_{кр}$ хвильовий опір різко зростає.

Максимальна відносна похибка експериментальних досліджень не перевищує 15% (Рис. 1-Рис. 6).

Табл. 2 Необхідний розмір поперечного перерізу в прямокутному хвилеводі залежно від модифікації ЧЗХ за $t_y = 1$, $f = 10$ ГГц

Модифікація	t_y	t_x	$a \times b$ см, ($\varepsilon_r = 2$)	
			Розрахунок	Експеримент
2-1-2	1	0,174	(2, 29 × 1, 145)	(2, 24 × 1, 12)
	1	0,348	(2, 228 × 1, 114)	(2, 16 × 1, 08)
1-2	1	0,0869	(2, 293 × 1, 1465)	(2, 241 × 1, 1205)
	1	0,174	(2, 246 × 1, 123)	(2, 223 × 1, 1115)

Проведені експериментальні дослідження показують, що вираз (2) можна використовувати замість точного при $\varepsilon_r \leq 5$ для модифікацій 2-1-2 та 1-2 за будь-яких значень t_x та $t_y = 1$ для розрахунку антен, фазообертачів, узгоджувальних трансформаторів, тощо, а також вимірюванні діелектричної проникності матеріалів [8].

Висновки

1. Експериментальне дослідження впливу часткового діелектричного заповнення на електродинамічні характеристики та розміри прямокутного хвилеводу підтвердило доцільність та достатню точність наближеного методу [1], який відрізняється від існуючих тим, що для визначення сталих поширення у прямокутному хвилеводі із ЧДЗ не потрібно розв'язувати трансцендентні дисперсійні рівняння.

2. Максимальна відносна похибка результатів експериментальних досліджень впливу часткового діелектричного заповнення на електродинамічні характеристики та розміри прямокутного хвилеводу для модифікацій 2-1-2, 1-2 не перевищує 15%, зокрема для модифікації 2-1-2 вона менша ніж для 1-2.

3. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів забезпечується збіжністю результатів розрахунку за граничних умов із відомими результатами та збіжністю отриманих формул за одиницями вимірювання, а також шляхом зіставлення експериментальних результатів з відомими теоретичними результатами.

4. Практичним значенням результатів досліджень є можливість проектування антен зі зменшеним поперечним перерізом хвилеводу за незмінних його електричних розмірів.

Перелік посилань

1. Манойлов В. П. Розрахунок хвилеводів з частковим діелектричним заповненням / В.П. Манойлов, В.В. Чухов // Вісник НТУУ „КПІ”. Радіотехніка. Радіоапаратуобудування. – 2006. – Вип. 33. – С. 91–100. DOI: 10.20535/RADAP.2006.33.91-100.
2. Castillo-Tapia, P., Mesa, F., Yakovlev, A., Valerio, G., Quevedo-Teruel, O. Study of Forward and Backward Modes in Double-Sided Dielectric-Filled Corrugated Waveguides / P. Castillo-Tapia, F. Mesa, A. Yakovlev, G. Valerio, O. Quevedo-Teruel // Sensors. – 2021. – Vol. 21(18), 6293. – pp. 1-15. <https://doi.org/10.3390/s21186293>.
3. Теорія електромагнітного поля та основи техніки НВЧ / Соколов С. В. та ін. за заг. ред. Г. С. Воробйова. – Суми: Сумський державний університет. – 2011. – 393 с.
4. Kyoung-Ho Kim, Q-Han Park. Effective medium characterization of partially-filled rectangular waveguides / Kyoung-Ho Kim, Q-Han Park // Journal of the Korean Physical Society. – 2014. – Vol. 64, No. 6. – pp. 771–774. <https://doi.org/10.3938/jkps.64.771>.
5. Weng Q., Lin Q., Wu H. An Efficient Semianalytical Modal Analysis of Rectangular Waveguides Containing Metamaterials with Graded Inhomogeneity / Weng Qianru, Lin Qian, Wu Haifeng // International Journal of Antennas and Propagation. – Vol. 2021, Article ID 6107378. <https://doi.org/10.1155/2021/6107378>.
6. Moradi, A. Electrostatic theory of rectangular waveguides filled with anisotropic media / A. Moradi // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11, Article No. 24522. – pp. 771–774. <https://www.nature.com/articles/s41598-021-04293-6>.
7. Bogle A. et al. Electromagnetic Material Characterization using a Partially-Filled Rectangular Waveguide / A. Bogle, M. Havrilla, D. Nyquis, L. Kempel, E. Rothwell // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2012. – Vol. 19, No. 10. – pp. 1291-1306. doi: 10.1163/156939305775525909.
8. Casula, G. A., et al. A Review on Improved Design Techniques for High Performance Planar Waveguide Slot Arrays / G. A. Casula, G. Mazzarella, G. Montisci, G. A. Muntoni // Electronics. – 2021. – Vol. 10(11), 1311. – pp. 1-24. <https://doi.org/10.3390/electronics10111311>.
9. Kapusuz K. Y., et al. Partially Filled Half-Mode Substrate Integrated Waveguide Leaky-Wave Antenna for 24 GHz Automotive Radar / K. Y. Kapusuz, A. V. Berghe, S. Lemey, H. Rogier // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2021. – Vol. 20, No. 1. – pp. 33-37. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9261094>.
10. Почерняев В. М., Сивкова Н. М. Пристрій управління потужністю НВЧ на частково заповненому діелектриком прямокутному хвилеводі // В. М. Почерняев, Н. М. Сивкова // Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології. – 2022. – Vol. 1, No. 01. – pp. 81-89. DOI: 10.36994/2788-5518-2021-01-01-06.
11. Егоров Ю. В. Частично заполненные прямоугольные волноводы / Ю. В. Егоров. – Москва: Сов. Радио, 1967. – 216 с.
12. Бергер М. Н., Капилевич Б. Ю. Прямоугольные волноводы с диэлектриками / М. Н. Бергер, Б. Ю. Капилевич. – М.: Сов. радио, 1973. – 256 с.

13. Каращук Н. М., Манойлов В. П., Фриз С. П., Чухов В. В. Дослідження впливу часткового діелектричного заповнення на розміри прямокутного хвилеводу / Н. М. Каращук, В. П. Манойлов, С. П. Фриз, В. В. Чухов // Проблеми створення, випробування та застосування складних інформаційних систем: Збірник наукових праць. – Житомир: ЖВІ. – 2018. – Вип. 15. – С. 103–117.
14. Електродинаміка та поширення радіохвиль, Ч. 2. Випромінювання та поширення електромагнітних хвиль / Шокало В. М. та ін.; за ред. В. М. Шокало. – Харків: ХНУРЕ, Колегіум. – 2010. – 435 с.
15. Фторопласт Ф-4 листовий 6-05-810-88. ПП «Стандарт Комплект».

- [10] Pochernyaev V. N. & Syvkova N. M. (2022). Microwave power control device on a rectangular waveguide partially filled by dielectric. *Infocommunication and computer technologies*, Vol. 1, Iss. 1, pp. 81-89. DOI: 10.36994/2788-5518-2021-01-01-06. [In Ukrainian].
- [11] Ehorov Yu. V. (1967). Chastychno zapolnennye priamouholnye volnovody [Partially Filled Rectangular Waveguides]. Moskva, Sov. radyo Publ., 216 p. [In Russian].
- [12] Berher M. N., Kapylevych B. Yu. (1973). Priamouholnye volnovody s dielektrykamy [Rectangular waveguides with dielectrics]. Moskva, Sov. radyo Publ., 256 p. [In Russian].
- [13] Karashchuk N. M., Manoilo V.P., Fruz S. P., Chukhov V.V. (2018). Doslidzhennia vplyvu chastkovho dielektrychnoho zapovnennia na rosmiry priamokutnoho khvylevodu [Investigation of the influence of partial dielectric filling on the dimensions of a rectangular waveguide]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia ta zastosuвання skladnykh informatsiynikh system: Zbirnyk naukovykh prats*, Vol. 15, pp. 103–117. [In Ukrainian].
- [14] Shokalo V. M., eds. (2010). Elektrodynamika ta poshyrennia radiokhvyly, Ch.2. Vyprominiuvannia ta poshyrennia elektromahnitnykh khvyly [Electrodynamics and propagation of radio waves. P.2. Radiation and propagation of electromagnetic waves]. *Kharkiv, KhNURE, Kolehium Publ.*, 435 p. [In Ukrainian].
- [15] Ftoroplast F-4 sheet 6-05-810-88. *PE "Standard K"*.

References

- [1] Manoilo V. P., Chukhov V. V. (2006). Calculation of the waveguide with the shape dielectric fulfills. *Visnyk NTUU KPI Seriya Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, Vol. 33, pp. 91–100. doi: 10.20535/RADAP.2006.33.91-100. [In Ukrainian].
- [2] Castillo-Tapia, P., Mesa, F., Yakovlev, A., Valerio, G., Quevedo-Teruel, O. (2021). Study of Forward and Backward Modes in Double-Sided Dielectric-Filled Corrugated Waveguides. *Sensors*, Vol. 21(18), Iss. 6293, pp. 1-15. DOI: 10.3390/s21186293.
- [3] Vorobiov H. S., Cokolov S. V. eds. (2011). Teoriia elektromahnitnoho polia ta osnovy tekhniki NVCh [Electromagnetic field theory and microwave engineering]. Sumy, Sumskyi derzhavnyi universytet Publ., 393 p. [In Ukrainian].
- [4] Kyoung-Ho Kim, Q-Han Park (2014). Effective medium characterization of partially-filled rectangular waveguides. *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 64, Iss. 6, pp. 771–774. DOI:10.3938/jkps.64.771.
- [5] Weng Q., Lin Q., Wu H. (2021). An Efficient Semianalytical Modal Analysis of Rectangular Waveguides Containing Metamaterials with Graded Inhomogeneity. *International Journal of Antennas and Propagation*, Vol. 2021, Article ID 6107378. DOI: 10.1155/2021/6107378.
- [6] Moradi, A. (2021). Electrostatic theory of rectangular waveguides filled with anisotropic media. *Scientific Reports*, Vol. 11, Article number: 24522, pp. 771–774. DOI: 10.1038/s41598-021-04293-6.
- [7] Bogle A., Havrilla M., Nyquis D., Kempel L., Rothwell E. (2012). Electromagnetic Material Characterization using a Partially-Filled Rectangular Waveguide. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 19, Iss. 10, pp. 1291-1306. DOI: 10.1163/156939305775525909.
- [8] Casula, G. A., Mazzarella, G., Montisci, G., Muntoni, G. A. (2021). A Review on Improved Design Techniques for High Performance Planar Waveguide Slot Arrays. *Electronics*, Vol. 10, Iss. 11, ID 1311, pp. 1-24. DOI: 10.3390/electronics10111311.
- [9] Kapusuz K. Y., Berghe A. V., Lemey S., Rogier H. (2021). Partially Filled Half-Mode Substrate Integrated Waveguide Leaky-Wave Antenna for 24 GHz Automotive Radar. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 20, Iss. 1, pp. 33-37. DOI: 10.1109/LAWP.2020.3038201.

Экспериментальное исследование влияния частичного диэлектрического заполнения на электродинамические характеристики и размеры прямоугольного волновода

Каращук Н. Н., Манойлов В. Ф., Чухов В. В., Герасименко В. В., Кондратов А. М., Ципоренко В. Г., Стависюк Р. Л.

Представлены результаты экспериментального исследования влияния частичного диэлектрического заполнения (ЧДЗ) на электродинамические характеристики и размеры прямоугольного волновода.

Результаты экспериментального исследования сравниваются с расчетными, полученными с помощью приближенного метода определения эффективной диэлектрической проницаемости и постоянной распространения частично заполненного волновода (ЧЗВ), представленного в [1]. Приближенный метод отличается от существующих тем, что для определения постоянной распространения в прямоугольном волноводе с ЧДЗ не нужно решать трансцендентные дисперсионные уравнения. В частности, приводятся результаты теоретического расчета зависимостей размера широкой стенки ЧЗВ с размерами поперечного сечения 23×10 мм от изменения коэффициента заполнения вдоль широкой стенки волновода на частоте 10 ГГц, длины волны, поперечного волнового сопротивления ЧЗВ и постоянной распространения от изменения коэффициента заполнения вдоль широкой стенки волновода в полосе частот 6–14 ГГц для модификации 2–1–2 (тонкие диэлектрические пластины возле боковых стенок) и 1–2 (тонкая диэлектрическая пластина возле одной боковой стенки) для волны типа H_{10} .

Экспериментальные исследования проведены с помощью лабораторной установки, состоящей из генератора сигналов, измерителя отношений напряжений, измерительной линии на базе прямоугольного волновода, к выходу которой присоединялся короткозамыкатель. Внутри прямоугольного волновода измерительной линии устанавливались диэлектрические пластины (фторопласт Ф4) шириной 10 мм, толщиной 2 мм и 4 мм, длиной 253 мм. Максимальная относительная погрешность результатов экспериментальных исследований для модификаций 2-1-2, 1-2 не превышает 15%, в частности для модификации 2-1-2 она меньше, чем для 1-2.

Представленные результаты подтверждают целесообразность и высокую точность расчетов электродинамических характеристик ЧЗВ приближенным методом [1].

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается достаточно высокой сходимостью результатов расчета с экспериментальными, при граничных условиях с известными результатами, сходимостью полученных формул по единицам измерения.

Ключевые слова: прямоугольный волновод; частичное диэлектрическое заполнение; эффективная диэлектрическая проницаемость; постоянная распространения; электрические размеры

Experimental Study of the Effect of Partial Dielectric Filling on Electrodynamic Characteristics and Rectangular Waveguide Dimensions

Karashchuk N. M., Manoilov V. P., Chukhov V. V., Herasymenko V. V., Kondratov A. M., Tsyoporenko V. G., Stavysiuk R. L.

The results of an experimental study of the effect of partial dielectric filling (PDF) on the electrodynamic characteristics and dimensions of a rectangular waveguide are presented.

The results of the experimental study are compared with the calculated ones obtained using an approximate method for determining the effective permittivity and propagation constant of a partially filled waveguide (PWF) presented in [1]. The approximate method differs from the existing ones in that it is not necessary to solve transcendental dispersion equations to determine the propagation constant in a rectangular waveguide with a PDF. In particular, the results of a theoretical calculation of the dependences of the size of the wide wall of the PWF with cross-sectional dimensions of 23×10 mm on the change in the fill factor along the wide wall of the waveguide at a frequency of 10 GHz, the wavelength, the wave impedance of the PWF, and the propagation constant on the change in the fill factor along the wide wall, waveguide in the frequency band 6–14 GHz for modification 2–1–2 (thin dielectric plates near the side walls) and 1–2 (thin dielectric plate near one side wall) for the H₁₀ type wave are presented.

Experimental studies were carried out using a laboratory setup consisting of a signal generator, a voltage ratio meter, a measuring line based on a rectangular waveguide, to the output of which a short circuit was connected. Dielectric plates (PTFE Ф4) 10 mm wide, 2 mm and 4 mm thick, and 253 mm long were installed inside the rectangular waveguide of the measuring line. The maximum relative error of the results of experimental studies for modifications 2-1-2, 1-2 does not exceed 15%, in particular, for modification 2-1-2 it is less than for 1-2.

The presented results confirm the feasibility and high accuracy of calculating the electrodynamic characteristics of the PWF by the approximate method [1].

The reliability and validity of the results obtained is ensured by a sufficiently high convergence of the calculation results with the experimental ones, under boundary conditions with known results, the convergence of the obtained formulas in units of measurement.

Keywords: rectangular waveguide; partial dielectric filling; effective permittivity; constant distribution; electrical dimensions