

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСТКОВОГО ДІЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАПОВНЕННЯ НА РОЗМІРИ ПРЯМОКУТНОГО ХВИЛЕВОДУ

Хвилевідно-щілинні антени достатньо широко застосовуються в наземних та бортових радіотехнічних системах. Однією з вимог до таких антен є зменшення масогабаритних показників, тому в статті на основі використання виразу для ефективної діелектричної проникності частково заповненого хвилеводу з однією та двома діелектричними пластинами досліджено можливість зменшення розмірів поперечного перерізу прямокутного хвилеводу. Побудовано графіки зміни розмірів широкої та вузької стінок прямокутного хвилеводу, який працює на основному типі коливань, за довільного розташування, проникностей та розмірів діелектричних пластин. Шляхом аналізу отриманих графіків пояснено вплив модифікації частково заповненого хвилеводу на ступінь прояву діелектричного ефекту та, відповідно, зміну розмірів поперечного перерізу хвилеводу. Показано, що, за умови розташування діелектричної пластини в центрі хвилеводу паралельно вузьким стінкам, поперечний переріз буде мати мінімальні розміри. Результати досліджень можуть бути використані для зменшення масогабаритних показників антенно-фідерних систем сантиметрового діапазону хвиль та тіньового ефекту в однодзеркальних антенах.

Ключові слова: *прямокутний хвилевід, часткове діелектричне заповнення, ефективна діелектрична проникність, постійна розповсюдження.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. На базі прямокутних хвилеводів зазвичай реалізують хвилевідно-щілинні антени (ХЩА), які можна використовувати у вигляді самостійного випромінювача, а також у складі антенних решіток або дзеркальних антен. Широке застосування ХЩА мають у наземних та бортових радіолокаційних, радіорелейних, радіонавігаційних системах [1–3]. Одним із недоліків хвилевідно-щілинних решіток (ХЩР) є відхилення головного максимуму діаграми спрямованості (ДС) на певний кут від нормалі, за якого виникають інтерференційні максимуми вищих порядків. Для уникнення появи цих максимумів відстань між щілинами необхідно зменшувати. Також має місце застосування у вигляді самостійного випромінювача поодинокі напівхвильової щілинної антени як однієї зі слабоспрямованих антен. Основними вимогами, що ставляться до таких антен, є: узгодження в заданому діапазоні частот, рівномірність потужності, яка випромінюється, простота налаштування та малі розміри. Для виконання вказаних вимог приймаються різні конструктивні рішення. Таким чином, актуальним є розгляд способів запобігання появі дифракційних максимумів у ХЩР та забезпечення необхідних параметрів і характеристик поодинокі напівхвильової щілинної антени в заданому діапазоні робочих частот.

Отже, дослідження впливу розмірів, модифікації та діелектричного проникнення діелектричного шару частково заповненого хвилеводу (ЧЗХ) на зміну його розмірів є важливим та актуальним науково-практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відстань між щілинами для запобігання появи інтерференційних максимумів можна зменшувати різними способами.

Зменшення розмірів прямокутного хвилеводу зменшить потужність випромінювання, коефіцієнт спрямованої дії, смугу робочих частот, призведе до появи хвиль вищих типів [4]. Застосування хвилеводів П-подібної форми [1–3] або уповільнення хвилі у хвилеводі шляхом введення в нього діелектричного шару збільшить критичну довжину хвилі основного типу. Це дозволяє зменшити поперечний розмір хвилеводу і, як наслідок, зменшити відстань між випромінювачами в сусідніх лінійних решітках. Уповільнення хвилі у хвилеводі дозволяє зблизити випромінювачі в межах однієї лінійної решітки [5]. Симетричне заповнення хвилеводу шаром діелектрика, розміщеного паралельно його вузьким стінкам, розширює робочу смугу частот хвилеводу, змінює структуру поля в ньому, призводить до зміни резонансних частот і енергетичних характеристик щілин [5]. Це може бути використано для управління параметрами ХЩР.

У ХЩР із поздовжніми щілинами, прорізаними в шаховому порядку в широкій стінці хвилеводу з діелектричним шаром, за досить великого уповільнення хвилі виникає ситуація, коли ділянки розташування сусідніх щілин у поздовжньому напрямку частково перекриваються [6]. Дослідження характеристик лінійної ХЩР з урахуванням взаємодії поздовжніх щілин у разі, коли ділянки розташування сусідніх щілин уздовж осі хвилеводу частково перекриваються, показали, що вибором діелектричної проникності та товщини діелектричного шару, який частково заповнює хвилевід, можна істотно зменшити поперечні розміри лінійної ХЩР без погіршення енергетичних характеристик.

Отже, потенційно кращим із вказаних способів зменшення розмірів ХЩА є застосування частково заповнених хвилеводів.

Конструктивні рішення, які покращують енергетичні характеристики поодинокі напівхвильової щілинної антени в заданому діапазоні робочих частот, запропоновано в [7]. Антена виконана у вигляді відрізка прямокутного хвилеводу, уздовж середини верхньої широкої стінки якого прорізано довгу тонку щілину. Перпендикулярно площині довгої тонкої щілини розташовано металевий штир, виконаний у вигляді зрізаної піраміди з площею поперечного перерізу, меншою, ніж площа довгої тонкої щілини. Перпендикулярно площині вузької стінки відрізка прямокутного хвилеводу введено діелектричну пластину прямокутної форми на відстані $(0,45...0,5)b$ від довгої тонкої щілини, де b – висота вузької стінки відрізка прямокутного хвилеводу. Технічним результатом є поліпшення узгодження в діапазоні частот, підвищення рівномірності потужності випромінювання та спрощення налаштування антени [7]. У ХЩА наявність діелектричної пластини знижує критичні частоти всіх вищих типів хвиль, зменшує розміри хвилеводу [7].

Товщина діелектричних шарів, їх проникність, кількість та розташування мають різний вплив на необхідні розміри прямокутного хвилеводу. Тому доцільно провести дослідження можливості зменшення геометричних розмірів прямокутного хвилеводу шляхом часткового діелектричного заповнення з аналізом результатів.

Розв'язок електродинамічної задачі для ЧЗХ зводиться, у першу чергу, до пошуку постійної розповсюдження [8]. Розроблено декілька методів для визначення постійних розповсюдження та полів у ЧЗХ [8, 9].

До наближених методів, які широко використовуються, слід віднести варіаційні [8]. Проте вони дають високу точність розрахунків лише тоді, коли апроксимуюча функція поля виражається рядом з досить великою кількістю членів, що зумовлює складність обчислень [8]. Використання апроксимуючих функцій простішого виду призводить до значних похибок та потреби введення різних напівемпіричних коефіцієнтів.

Серед наближених методів дослідження ЧЗХ широко використовуються методи теорій збурень [8]. Більшість відповідних публікацій ґрунтуються на застосуванні першого наближення в основній формулі об'ємного збурення хвилеводу. Але для апроксимації поля знаходять застосування квазістатичні наближення, розв'язки дифракційної та точної граничної задач для двох окремих випадків [8].

Для прямокутного хвилеводу, заповненого двома різними діелектриками, використовують метод зв'язаних хвиль [8].

Наближений метод [9], який має прийнятну на практиці точність, не вимагає громіздких розрахунків для пошуку постійної розповсюдження в ЧЗХ. Отже, доцільно проаналізувати можливості зменшення геометричних розмірів прямокутного хвилеводу шляхом часткового діелектричного заповнення із застосуванням наближених методів розрахунку постійної розповсюдження.

Формулювання завдання дослідження. З урахуванням викладеного вище метою статті є дослідження можливості зменшення геометричних розмірів прямокутного хвилеводу шляхом часткового діелектричного заповнення. Для знаходження постійної розповсюдження буде використано наближений метод, розглянутий у роботі [9], де отримано загальний вираз для ефективної діелектричної проникності ЧЗХ з двома діелектричними пластинами та узагальнено випадок однієї діелектричної пластини за їх довільного розташування, проникностей та розмірів.

Виклад основного матеріалу. Оскільки хвилевід неоднорідний, то має бути введена ефективна діелектрична проникність середовища, яке його заповнює, для розрахунку основних електродинамічних характеристик [10]:

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_0 \varepsilon_r,$$

де ε_0 – відносна діелектрична проникність середовища, яким не заповнено хвилевід;

ε_r – відносна діелектрична проникність матеріалу, яким заповнено хвилевід.

Зазвичай постійну розповсюдження шукають у такий спосіб [9]:

$$\gamma^2 = k^2 \varepsilon_r - \chi^2, \quad (1)$$

де $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число вакууму, рад/м;

λ – довжина хвилі, м;

χ – поперечне хвильове число, рад/м.

Згідно з [11, 12] перший доданок у (1) можна подати у вигляді $k^2 \varepsilon_{ef}$. Вираз для ε_{ef} можна записати через власні поперечні векторні функції порожнистого хвилеводу:

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_{серед} \varepsilon_{\perp}, \quad (2)$$

де

$$\varepsilon_{серед} = \frac{1}{S_{\perp}} \int_{S_{\perp}} \varepsilon_r(x, y) ds, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{1}{\varepsilon_{серед}} \int_{S_{\perp}} \varepsilon_r(x, y) \bar{E}_a \bar{E}_{a'} ds, \quad (4)$$

$\varepsilon_r(x, y)$ – функція розподілу ε_r у поперечному перерізі хвилеводу;

$S_{\perp} = S_0 + S_{\delta}$ – площа поперечного перерізу хвилеводу, м²;

S_{δ} – площа поперечного перерізу діелектрика, м²;

$\bar{E}_a, \bar{E}_{a'}$ – поперечні електричні власні векторні функції порожнистого хвилеводу, В/м (для основної хвилі $\bar{E}_a = \bar{E}_{a'} \equiv \bar{E}$).

Для ЧЗХ з однією діелектричною пластиною (рис. 1) ефективна діелектрична проникність для хвилі типу H_{10} буде [9]:

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_1 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \left(1 - \cos \frac{\pi(2x_1 + c)}{a} \sin c \frac{\pi c}{a} \right) \frac{cd}{ab}, \quad (5)$$

де ε_1 – відносна діелектрична проникність середовища, яке не заповнене діелектриком;

ε_2 – відносна діелектрична проникність діелектричної пластини;

c – розмір діелектричної пластини вздовж осі x (широкої стінки) хвилеводу, м;

d – розмір діелектричної пластини вздовж осі y (вузької стінки) хвилеводу, м;

a – розмір широкої стінки хвилеводу, м.

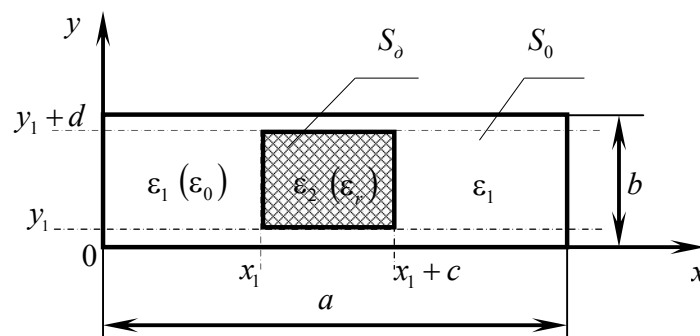


Рис. 1. ЧЗХ з однією діелектричною пластиною

Якщо хвилевід заповнено повітрям $\varepsilon_1 = 1$, а діелектрик має проникність $\varepsilon_2 = \varepsilon_r$, то [9]:

$$\varepsilon_{ef} = 1 + (\varepsilon_r - 1) \left(1 - \cos \frac{\pi(2x_1 + c)}{a} \sin c \frac{\pi c}{a} \right) \frac{cd}{ab}, \quad (6)$$

де $\sin c\xi = \frac{\sin \xi}{\xi}$.

Для забезпечення подальшого аналізу використаємо [9]:

$$\eta = \left(1 - \cos \frac{\pi(2x_1 + c)}{a} \sin c \frac{\pi c}{a} \right) \frac{cd}{ab} = \left(1 - \cos \frac{\pi(2x_1 + at_x)}{a} \sin c \pi t_x \right) t_x t_y, \quad (7)$$

де $t_x = c/a$ – коефіцієнт заповнення хвилеводу вздовж осі x ;

$t_y = d/b$ – коефіцієнт заповнення хвилеводу вздовж осі y .

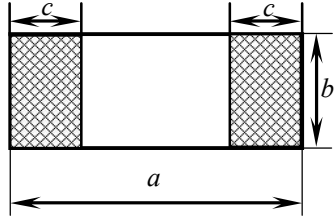
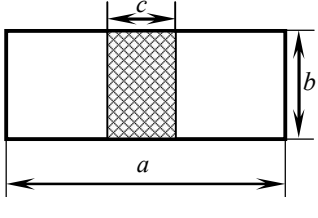
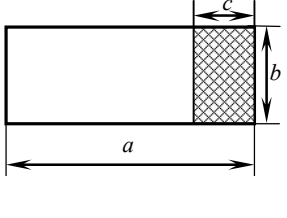
З урахуванням (7) вираз (6) набуде такого вигляду:

$$\varepsilon_{ef} = 1 + (\varepsilon_r - 1)\eta. \quad (8)$$

Вираз (7) підходить для модифікацій ЧЗХ 2–1–2, 1–2–1, 1–2, вигляд яких та значення множника заповнення η наведено в табл. 1 [9] за умови $t_y = 1$, тобто заповнення вздовж вузької стінки повне.

Таблиця 1

Множник заповнення для різних модифікацій ЧЗХ

Модифікація ЧЗХ			
	2–1–2	1–2–1	1–2
			
η	$(1 - \sin c \pi t_x) t_x$	$(1 + \sin c \pi t_x) t_x$	$(1 - \sin c 2 \pi t_x) t_x$
t_x	$2c/a$	c/a	c/a

Знайдемо зв'язок розмірів поперечного перерізу прямокутного хвилеводу з ефективною діелектричною проникністю.

За визначенням [10], коефіцієнт сповільнення хвилі дорівнює:

$$m = \lambda / \lambda_{x\phi}, \quad (9)$$

де $\lambda_{x\phi}$ – довжина хвилі у хвилеводі, м.

Довжина хвилі у хвилеводі, у свою чергу, визначається його фазовим коефіцієнтом β [10]:

$$\lambda_{x\phi} = 2\pi / \beta. \quad (10)$$

Підставляючи (10) у (9), отримаємо

$$m = \beta / k, \quad (11)$$

звідки

$$\beta = km. \quad (12)$$

З іншого боку, згідно з (1) маємо [9]:

$$\beta^2 = k^2 \varepsilon_r - \chi^2 = k^2 \left[\varepsilon_r - \left(\frac{\chi}{k} \right)^2 \right]. \quad (13)$$

У результаті комплектування виразів (12) і (13) отримаємо формулу, яка виражає зв'язок між коефіцієнтом сповільнення та ефективною діелектричною проникністю [9]:

$$m = \sqrt{\varepsilon_{ef} - \left(\frac{\chi}{k} \right)^2}. \quad (14)$$

В окремому випадку для хвилі типу H_{10} прямокутного хвилеводу ($\chi = \pi/a$) отримаємо з (14)

$$m = \sqrt{\varepsilon_{ef} - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}. \quad (15)$$

Тоді довжина хвилі хвилеводу, частково заповненого діелектриком, згідно з виразами (10), (12) та (15) буде дорівнювати:

$$\lambda_{xв} = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{km} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_{ef} - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}} = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_{ef} - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}}. \quad (16)$$

Критична довжина хвилі у хвилеводі з урахуванням ефективною діелектричною проникності дорівнює

$$\lambda_{кр} = 2a \sqrt{\varepsilon_{ef}}. \quad (17)$$

Тоді розмір широкої стінки хвилеводу, пов'язаний з ефективною діелектричною проникністю, визначаємо таким чином:

$$a = \frac{\lambda_{кр}}{2\sqrt{\varepsilon_{ef}}}. \quad (18)$$

Розмір вузької стінки хвилеводу вибирають із умови $b = (0,4..0,5)a$ [10], нехай $b = 0,5a$.

Отриманий вираз (18) дозволяє провести дослідження впливу відносної діелектричною проникності діелектрика ЧЗХ ε_r на зміну необхідних геометричних розмірів стандартного хвилеводу (23×10) мм для хвилі типу H_{10} .

За формулами (8), (9), (18), коли $\lambda_{кр} = 2a = 2 \cdot 2,3 = 4,6$ см для стандартного хвилеводу (23×10) мм, побудуємо графіки залежності розмірів хвилеводу від зміни відносної

діелектричної проникності діелектрика ЧЗХ ϵ_r та коефіцієнта заповнення $t_y = a(\epsilon_r, t_y)$, $b(\epsilon_r, t_y)$. Зміна розмірів діелектрика ЧЗХ така: уздовж координати x розмір незмінний – $c = 0,5$ см, $t_x = 0,217$; уздовж координати y – $t_y = d = (0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8)$ см (рис. 2).

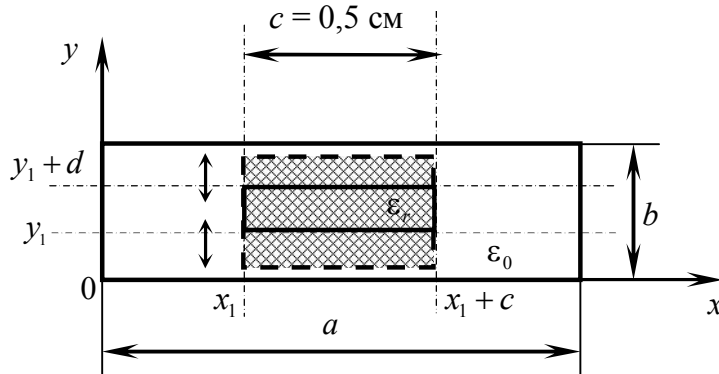


Рис. 2. ЧЗХ з діелектричним заповненням, що змінюється вздовж координати y

Графіки залежності $a(\epsilon_r, t_y)$ зображені на рис. 3, а $b(\epsilon_r, t_y)$ – на рис. 4.

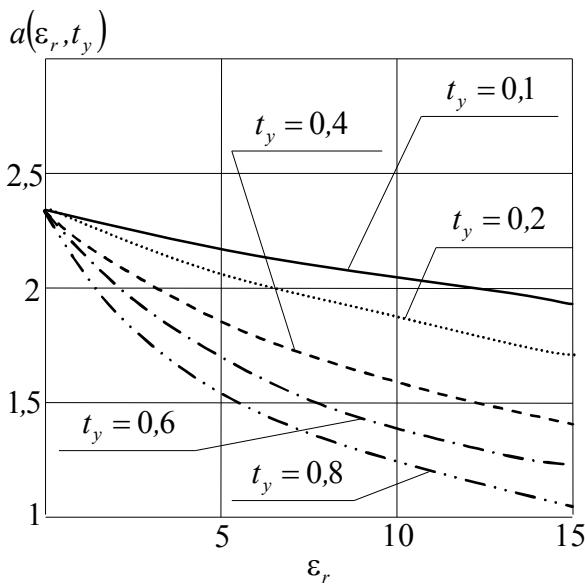


Рис. 3. Графіки залежності $a(\epsilon_r, t_y)$ за $t_x = 0,217$

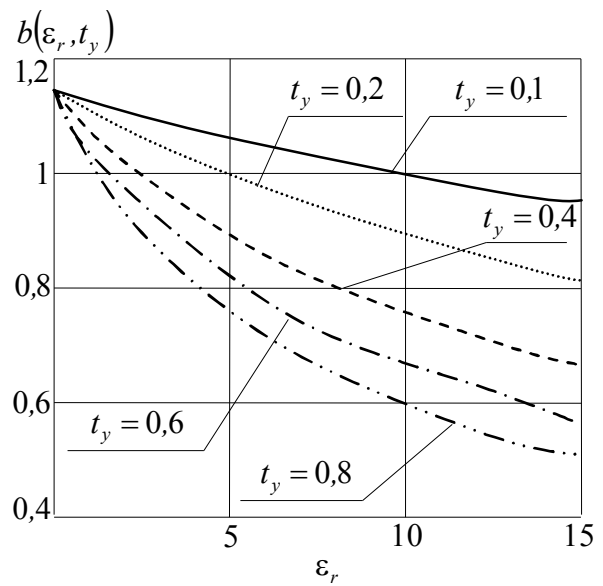


Рис. 4. Графіки залежності $b(\epsilon_r, t_y)$ за $t_x = 0,217$

Згідно з рис. 3 і 4 за збільшення відносної діелектричної проникності діелектрика ϵ_r , можна використати менший хвилевід. Чим більший коефіцієнт його заповнення діелектриком уздовж координати y t_y , тим менші розміри стінок a та b .

Побудуємо графіки залежності розмірів хвилеводу від зміни відносної діелектричної проникності діелектрика ЧЗХ ϵ_r та коефіцієнта заповнення t_x (рис. 5) – $a(\epsilon_r, t_x)$, $b(\epsilon_r, t_x)$. Зміна розмірів діелектрика ЧЗХ така: уздовж координати y розмір незмінний – $t_y = 0,8$; уздовж координати x – $t_x = (0,304; 0,13; 0,478; 0,652; 0,826)$ см.

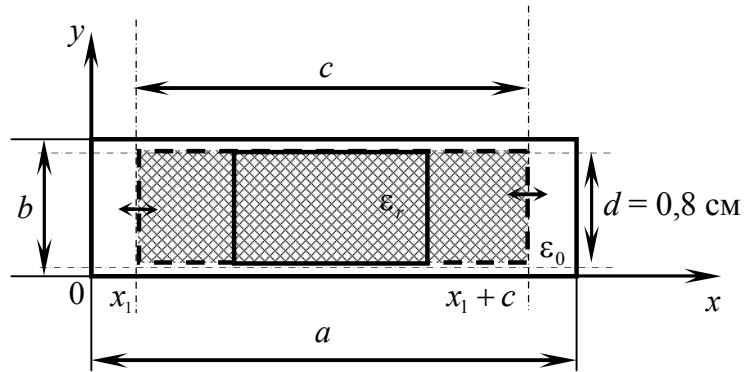


Рис. 5. ЧЗХ з діелектричним заповненням, що змінюється вздовж координати x

Графіки залежностей $a(\varepsilon_r, t_x)$ наведено на рис. 6, $b(\varepsilon_r, t_x)$ – на рис. 7.

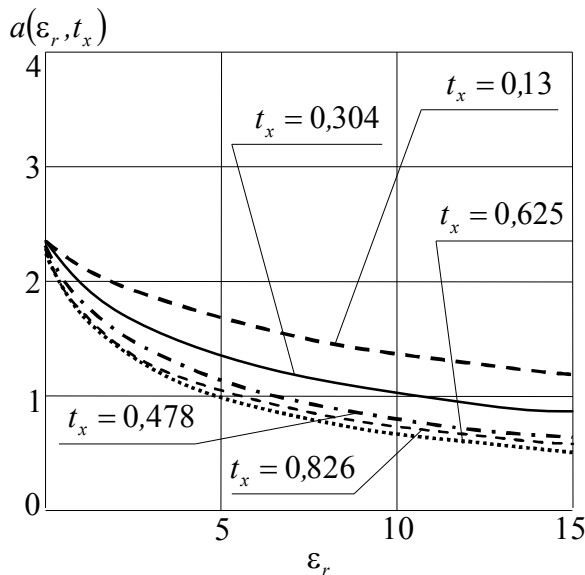


Рис. 6. Графіки залежності $a(\varepsilon_r, t_x)$ за $t_y = 0,8$

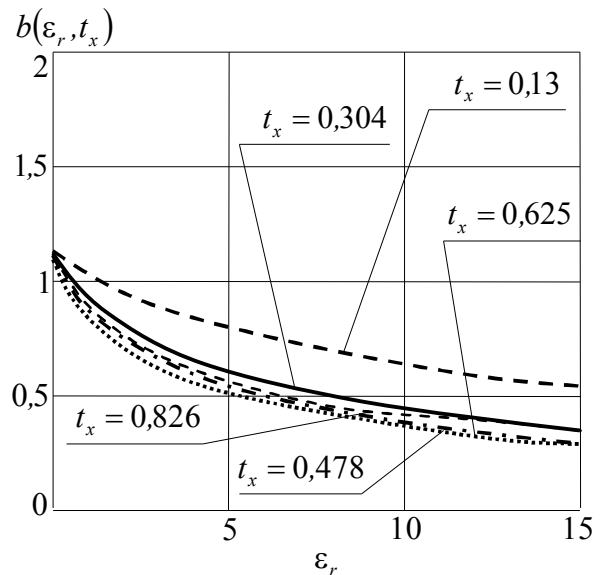


Рис. 7. Графіки залежності $b(\varepsilon_r, t_x)$ за $t_y = 0,8$

Аналіз рис. 6 і 7 показує, що за всіх значень коефіцієнтів заповнення t_x збільшення ε_r дозволяє застосовувати хвилевід менших розмірів. За розташування пластини діелектрика згідно з рис. 5 незбурене поле хвилеводу нормальне до її меж. Коли значення t_x мале, то розподіл поля поблизу пластини носить квазістатичний характер. Електричне поле в пластині в ε_r раз менше, ніж в незаповненій частині, тому вплив на фазову швидкість незначний. За збільшення t_x пластини поступово набуває властивостей діелектричного хвилеводу, з'являється поздовжня складова електричного поля, хвиля швидко сповільнюється. У такому разі розміри хвилеводу можна обирати менші. Проте наявне критичне значення коефіцієнта заповнення ($t_x = 0,826$), після якого немає суттєвого впливу на поперечний переріз хвилеводу.

Для частково заповненого хвилеводу з двома діелектричними пластинами (рис. 8), використовуючи вираз (2), можна отримати [9]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ef} &= \varepsilon_1 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \left(1 - \frac{1}{2} \left(\cos \frac{\pi(2x_1 + c)}{a} + \cos \frac{\pi(2x_2 + c)}{a} \right) \sin c \frac{\pi t_x}{2} \right) t_x t_y = \\ &= \varepsilon_1 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \left(1 - \cos \frac{\pi(x_1 + x_2 + c)}{a} \cos \frac{\pi(x_1 + x_2)}{a} \sin c \frac{\pi t_x}{2} \right) t_x t_y, \end{aligned} \quad (19)$$

де $t_x = 2c/a, t_y = d/b$.

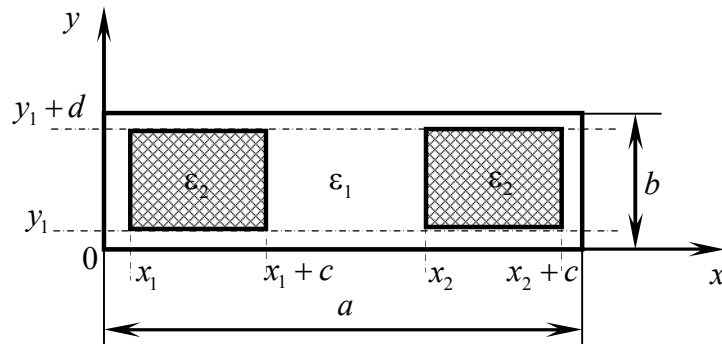


Рис. 8. Частково заповнений хвилевід із двома діелектричними пластинами

Прирівнюючи отриманий вираз до (5) та (8), маємо формулу для множника заповнення:

$$\eta = \left(1 - \cos \frac{\pi(x_1 + x_2 + c)}{a} \cos \frac{\pi(x_1 + x_2)}{a} \sin c \frac{\pi t_x}{2} \right) t_x t_y. \quad (20)$$

З урахуванням (20) вираз (19) набуде такого вигляду [9]:

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_1 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \eta. \quad (21)$$

Для випадку, коли $\varepsilon_1 = 1, \varepsilon_2 = \varepsilon_r$, з (21) матимемо [9]:

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_1 + (\varepsilon_r - 1) \eta. \quad (22)$$

Вплив зміни відносної діелектричної проникності та положення діелектричних пластин відносно вузьких стінок прямокутного хвилеводу на розміри його поперечного перетину наведено на графіках $a(x_1, x_2, \varepsilon_r)$ (рис. 9), $b(x_1, x_2, \varepsilon_r)$ (рис. 10), побудованих за формулами (19)–(22) за незмінних значень коефіцієнтів заповнення. Згідно з рис. 9 і 10 положення двох діелектричних пластин відносно вузьких стінок хвилеводу на значення розміру поперечного перерізу хвилеводу не впливає.

На рис. 11 і 12 наведено графіки залежностей $a(\varepsilon_r, x_1, x_2)$, $b(\varepsilon_r, x_1, x_2)$ за значень коефіцієнтів заповнення $t_x = 0,174, t_y = 0,5$.

Аналіз рис. 9–12 показує, що для зменшення розмірів широкої та вузької стінок хвилеводу необхідно збільшувати значення коефіцієнтів заповнення та ε_r .

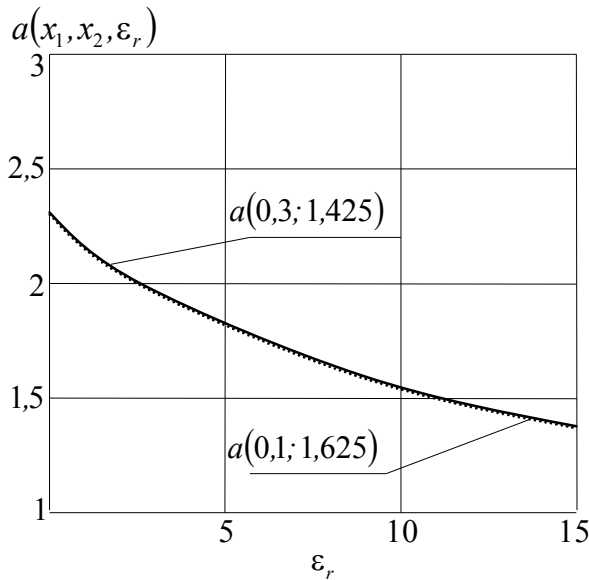


Рис. 9. Графіки залежності $a(x_1, x_2, \epsilon_r)$ за значень коефіцієнтів заповнення $t_y = 0,8, t_x = 0,5$

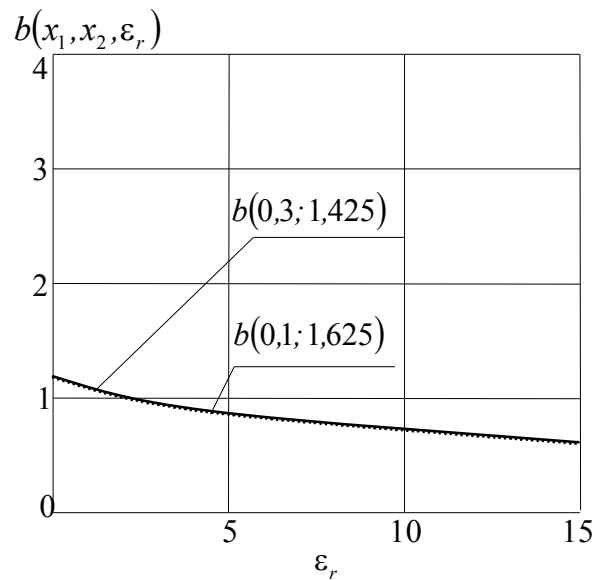


Рис. 10. Графіки залежності $b(x_1, x_2, \epsilon_r)$ за значень коефіцієнтів заповнення $t_y = 0,8, t_x = 0,5$

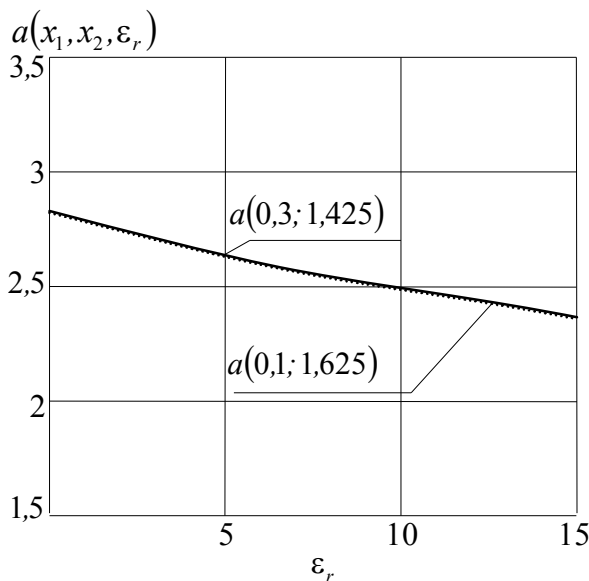


Рис. 11. Графіки залежності $a(x_1, x_2, \epsilon_r)$ за значень коефіцієнтів заповнення $t_x = 0,174, t_y = 0,5$

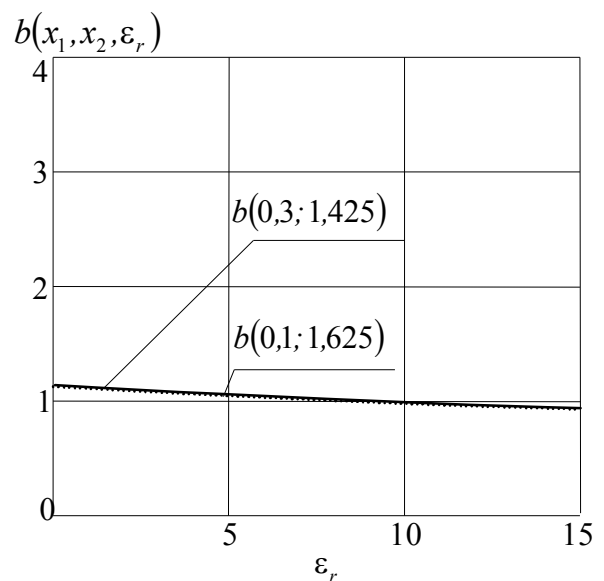


Рис. 12. Графіки залежності $b(x_1, x_2, \epsilon_r)$ за значень коефіцієнтів заповнення $t_x = 0,174, t_y = 0,5$

Розглянемо випадок модифікації заповнення діелектриком 1–2–1 (див. табл. 1), коли $t_y = 1$.

Згідно з виразами (8), (9), (16) і величиною η , взятою з табл. 1, за значень коефіцієнтів заповнення $t_x = 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,8$ та $t_y = 1$, графіки залежностей $a(\epsilon_r)$ матимуть вигляд, наведений на рис. 13, $b(\epsilon_r)$ – на рис. 14.

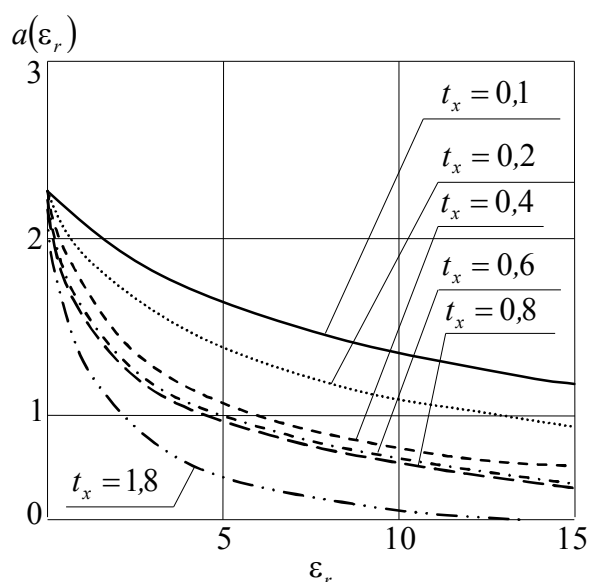


Рис. 13. Графіки залежності $a(\varepsilon_r)$ за різних значень t_x

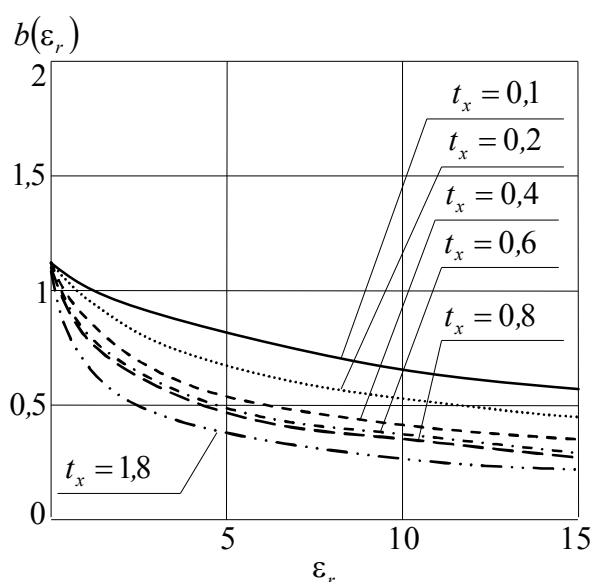


Рис. 14. Графіки залежності $b(\varepsilon_r)$ за різних значень t_x

З графіків на рис. 13 і 14 випливає, що модифікація 1–2–1 передбачає розташування пластини паралельно вектору напруженості електричного поля в його максимумі. Діелектрична пластина вже за малих значень t_x має сильну взаємодію з полем хвилеводу. Наявний діелектричний ефект, який полягає в тому, що за досягнення певного значення t_x ($t_x = 0,6$), коли поле майже повністю сконцентроване в діелектрику, подальше збільшення t_x розміри хвилеводу a та b суттєво не змінює.

Дослідження зміни графіків залежностей $a(t_x, \varepsilon_r)$, $b(t_x, \varepsilon_r)$ для ЧЗХ модифікації 2–1–2 (див. табл. 1) за значень коефіцієнтів заповнення $t_y = 1$ та змінного t_x наведено на рис. 15 і 16.

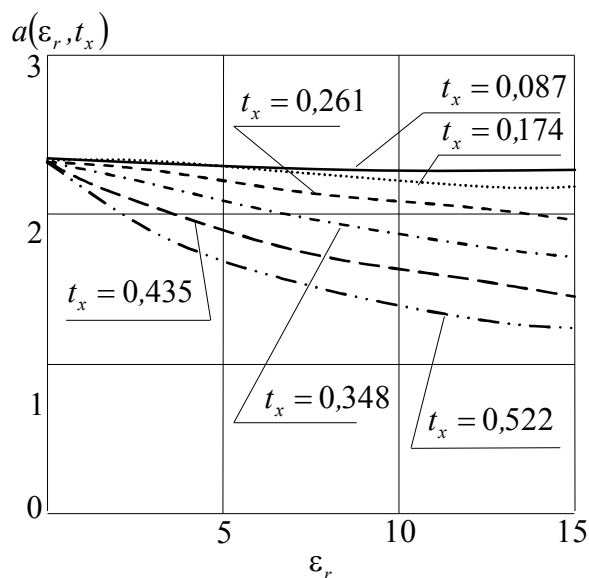


Рис. 15. Графіки залежності розміру широкій стінки хвилеводу від ε_r за різних значень t_x

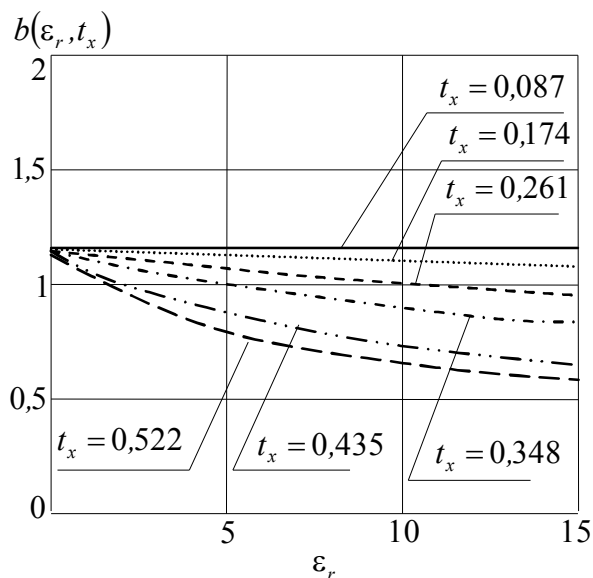


Рис. 16. Графіки залежності розміру вузькій стінки хвилеводу від ε_r за різних значень t_x

Аналіз рис. 15, 16 дозволяє зробити такі висновки. За модифікації 2–1–2 діелектричні пластини розташовані в мінімумах електричного поля хвилеводу. Коли значення t_x мале, то пластини знаходяться в мінімумах електричного поля і практично не впливають на постійну розповсюдження, поле спотворюється слабо. У такому разі розміри хвилеводу можна змінювати незначно. За збільшення 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. Подальше збільшення t_x мало впливає на постійну розповсюдження. Таким чином, у даному разі діелектричний ефект викликає нелінійну залежність розмірів хвилеводу від коефіцієнта заповнення t_x . Слід зазначити, що помітний вплив діелектричних пластин починається з критичного значення $t_x = 0,348$. Порівнюючи хвилеводи з однією діелектричною пластиною та двома, можна стверджувати, що для досягнення одного і того ж ефекту хвилевід із двома пластинами потребує майже вдвічі більшого об'єму діелектрика.

Графіки залежностей $a(t_x, \epsilon_r)$, $b(t_x, \epsilon_r)$ для ЧЗХ модифікації 2–1 (див. табл. 1) за значень коефіцієнтів заповнення $t_y = 1$ та змінного t_x наведено на рис. 17 і 18 відповідно.

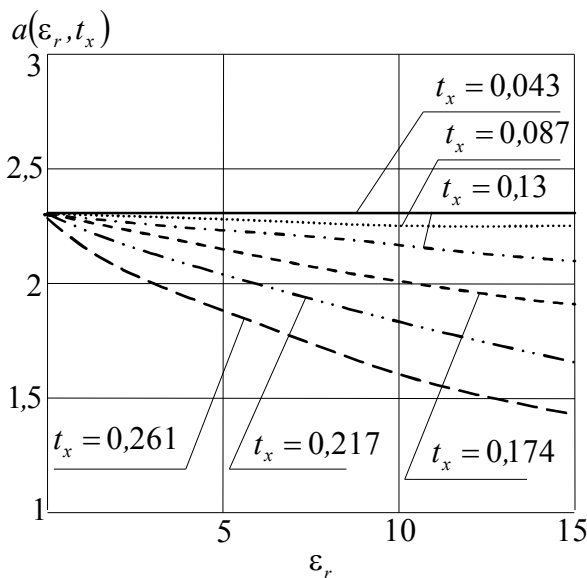


Рис. 17. Графіки залежностей $a(\epsilon_r, t_x)$

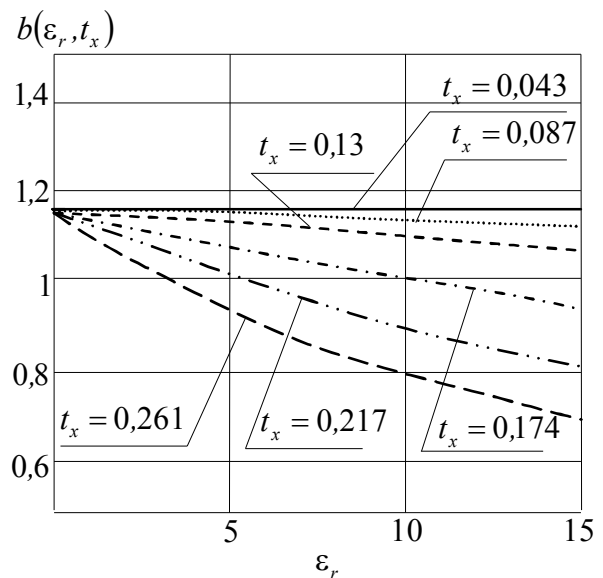


Рис. 18. Графіки залежностей $b(\epsilon_r, t_x)$

З графіків рис. 17 і 18 випливає, що за модифікації 2–1 ЧЗХ, порівняно з модифікаціями 1–2–1 та 2–1–2, наявний менш виражений вплив ϵ_r та t_x на розміри поперечного перерізу хвилеводу, оскільки спостерігається слабкий прояв діелектричного ефекту.

Проведемо порівняльний аналіз впливу модифікації ЧЗХ на зміну розміру поперечного перерізу прямокутного хвилеводу ($a \times b$) відповідно до рис. 3–18. Результати порівняльного аналізу впливу модифікації ЧЗХ із $t_y = 1$ на зміну розміру хвилеводу наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Необхідний розмір поперечного перерізу прямокутного хвилеводу
залежно від модифікації ЧЗХ та ϵ_r

Модифікація	t_x	t_y	$(a \times b)$ см, ($\epsilon_r = 5$)	$(a \times b)$ см, ($\epsilon_r = 10$)
2–1–2	0,25	1	(1,75 × 0,875)	(1,417 × 0,708)
1–2–1	0,25	1	(1,351 × 0,675)	(1,001 × 0,501)
1–2	0,25	1	(1,97 × 0,985)	(1,706 × 0,853)

Результати порівняльного аналізу впливу модифікації ЧЗХ із $t_y \neq 1$ на зміну розміру хвилеводу узагальнено в табл. 3.

Таблиця 3

Необхідний розмір поперечного перерізу прямокутного хвилеводу
залежно від модифікації ЧЗХ із $t_y \neq 1$ та ϵ_r

Модифікація	t_x	t_y	$(a \times b)$ см, ($\epsilon_r = 5$)	$(a \times b)$ см, ($\epsilon_r = 10$)
2–1–2	0,25	0,7	(2,053 × 1,027)	(1,834 × 0,917)
1–2–1	0,25	0,7	(1,558 × 0,779)	(1,203 × 0,602)

Узагальнений аналіз рис. 3–18 (табл. 1–3) показує, що:

серед модифікацій 2–1–2 та 1–2–1 менший поперечний переріз хвилеводу буде за модифікації 1–2–1, яка зумовлює значний ступінь прояву діелектричного ефекту;

для модифікацій 2–1–2 та 1–2–1, коли $t_y = 1$, розміри хвилеводу будуть меншими, порівняно із випадком неповного заповнення $t_y \neq 1$;

для всіх модифікацій за збільшення ϵ_r значення поперечних розмірів хвилеводу зменшується у $\sqrt{\epsilon_r}$ разів;

із застосуванням часткового заповнення хвилеводу діелектриком можна зменшити розміри стандартного хвилеводу (23 × 10) мм у необхідну кількість разів шляхом підбору модифікації та ϵ_r .

Висновки. Таким чином, у результаті проведеного дослідження проаналізовано можливості використання часткового діелектричного заповнення для зменшення необхідних розмірів прямокутних хвилеводів. При цьому враховано: основні модифікації часткового заповнення; розміри елементів діелектричного заповнення; відносну діелектричну проникність матеріалу; коефіцієнти заповнення хвилеводу вздовж осей. Наукова новизна результатів дослідження полягає в удосконаленні математичного забезпечення для розрахунків прямокутних хвилеводів із частковим діелектричним заповненням. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що вони можуть бути використані для зменшення масогабаритних показників антенно-фідерних систем сантиметрового діапазону хвиль, зокрема у відповідних портативних радіоелектронних

засобах і безпілотних літальних апаратах. Також результати дослідження можуть застосовуватися для зменшення тіньового ефекту в однодзеркальних антенах.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку полягають у розвитку запропонованого математичного забезпечення для розрахунку складних конструкцій ХЩА та опромінювачів із частковим діелектричним заповненням.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Novel Single-Layer Waveguides for High Efficiency Millimeter-Wave Arrays / Ando M., Hirokawa J., Yamamoto T., Akiyama A., Kimura Y., Goto N. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1998. Vol. 46, No. 6. P. 792–799.
2. Electrodynamic optimization of flat twoinput antennas / Sestroretsky B. V., Prigoda B. A., Ivanov S. A., Drize M. A. // Proc. of the 28 Moscow Int. Conf. on Antenna Theory and Technology. Moscow. 1998. P. 284–290.
3. Wang W., Zhong Y.-M., Liang X.-L. A Broadband Slotted Ridge Waveguide Antenna Array // IEEE Trans. Antennas Propag. 2006. Vol. 54, No. 8. P. 2416–2420.
4. Карашук Н. М., Манойлов В. П., Сабадаш С. С. Аналіз залежності характеристик випромінювання прямокутного хвилеводу від зміни його розмірів // Вісник ЖДТУ. 2016. № 76, Вип. 1. С. 33–46.
5. Яцук Л. П., Ляховский А. Ф., Ляховский А. А. Закономерности частотного сканирования в волноводно-щелевых антеннах с продольным диэлектрическим слоем внутри волновода // Вісник Харківського ун-ту. Радіофізика та електроніка. 2000. № 467, Вип. 1. С. 27–30.
6. Ляховский А. А., Яцук Л. П., Ляховский А. Ф. Система продольных щелей в прямоугольном волноводе с диэлектрическим слоем, параллельным его узким стенкам // Радиофізика и радиоастрономия. 2010. Т. 15, № 2. С. 216–223.
7. Манойлов В. П., Карашук Н. М. Хвилевідно-щілинна антена : пат. на винахід 106296 С 2 Україна. № 14838 ; заявл. 25.06.2014 ; опубл. 11.08.2014, Бюл. № 15. 4 с.
8. Егоров Ю. В. Частично заполненные прямоугольные волноводы. Москва : Сов. радио, 1967. 216 с.
9. Манойлов В. П., Чухов В. В. Розрахунок хвилеводів з частковим діелектричним заповненням // Вісник Нац. техніч. ун-ту України „КПІ”. Серія „Радіотехніка. Радіоапаратобудування”. 2006. Вип. 33. С. 91–100.
10. Иванов В. О., Габрусенко Є. І., Сібрук Л. В. Електродинаміка та пристрої надвисоких частот. Київ : Вид-во Нац. авіац. ун-ту “НАУ-друк”, 2009. 312 с.
11. Мурмушев Б. А., Самородов В. В., Спиридонов О. П. Дисперсионные характеристики металлодиэлектрических волноводов // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44, № 2. С. 157–165.
12. Капилевич Б. Ю., Трубехин Е. Р. Волноводно-диэлектрические фильтрующие структуры : справочник. Москва : Радио и связь, 1990. 272 с.
13. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. Москва : Радиотехника, 1996. 581 с.

Подано 23.07.2018

Н. Н. Карашук, В. Ф. Манойлов, С. П. Фриз, В. В. Чухов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТИЧНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАПОЛНЕНИЯ НА РАЗМЕРЫ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

Волноводно-щелевые антенны достаточно широко применяются в наземных и бортовых радиотехнических системах. Одним из требований к таким антеннам является уменьшение массогабаритных показателей, поэтому в статье на основе использования выражения для эффективной диэлектрической проницаемости частично заполненного волновода с одной и двумя диэлектрическими пластинами исследована возможность уменьшения размеров поперечного сечения прямоугольного волновода. Построены графики изменения размеров широкой и узкой стенок прямоугольного волновода, который работает на основном типе колебаний, от произвольного расположения, проницаемости и размеров диэлектрических пластин. Путем анализа полученных графиков объяснено влияние модификации частично заполненного волновода на степень проявления диэлектрического эффекта и, соответственно, изменение размеров поперечного сечения волновода. Показано, что, при условии расположения диэлектрической пластины в центре волновода параллельно узким стенкам, поперечное сечение будет иметь минимальные размеры. Результаты исследований могут быть использованы для уменьшения массогабаритных показателей антенно-фидерных систем сантиметрового диапазона волн и теневого эффекта в однозеркальных антеннах.

Ключевые слова: *прямоугольный волновод, частичное диэлектрическое заполнение, эффективная диэлектрическая проницаемость, постоянная распространения.*

N. N. Karashchuk, V. F. Manoilov, S. P. Fryz, V. V. Chukhov

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE PARTIAL DIELECTRIC LOADING ON RECTANGULAR WAVEGUIDE DIMENSIONS

Slotted waveguide antennas are widely used in ground and onboard radio systems. One of the requirements that can be put forward to such antennas is the reduction of mass-dimension characteristics. Therefore, the possibility of reducing the cross-sectional dimensions of a rectangular waveguide based on the use of the expression for the effective dielectric constant of a partially filled waveguide (PFW) with one and two dielectric plates was investigated in the article. The graphs of the change in the sizes of the wide and narrow walls of a rectangular waveguide, which works on the dominant type of oscillations, on the arbitrary arrangement, permeability and dimensions of dielectric plates are drawn. By analyzing the obtained graphs, the influence of the PFW modification on the degree of manifestation of the dielectric effect and, accordingly, on the change in the dimensions of waveguide cross-section is explained. It is shown that if the dielectric plate is located in the center of the waveguide parallel to the narrow walls, the cross-section will have minimal dimensions. The results of the research can be used for reducing the mass-dimension characteristics of antenna-feeder systems of the centimeter-wave band and the shaded effect in single-reflector antennas

Keywords: *rectangular waveguide, partial dielectric loading, effective dielectric constant, propagation constant.*