

диэлектрических экранов. В кн. Тезисы докладов IV Всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок, 10-12 сентября 1985, с. 84-85.

4. Verlan A.F., Sytnyk A.A., Abdusatarov B.B., Miraziz Sagatov. Analysis of power circuits' dynamics using generalized state-space model. Fourth World on Intelligent Systems for industrial Automation. –Tashkent, Uzbekistan. – November 21-22. – 2006. – С. 168-176.

5. Верлань А.Ф., Ситник О.О., Ключка К.М. Інтегральні рівняння аналізу нестационарних електричних систем. Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи". Львів – 2009. № 637. С.12-17.

6. Воробьев Г.А. О природе процессов формовки тонкопленочной системы металл-диэлектрик-металл. –Радиотехника и электроника, 1981, т.26, №3, с.655-656.

7. Вайсберг С.Э. Обратимые радиационные эффекты в полимерах. – В кн.: Радиационная химия полимеров. Под ред. В.А.Каргина. – М.: Наука, 1973. – 376 с.

8. Петренко Л.Г., Биньков С.Б. О процессе самовосстановления электрической прочности металлизированных диэлектриков. – Электричество, 1984, №3, с. 72-74.

*Ситник О.О., Самойлік О.В., Кищенко Я.І. Математичне моделювання електричного поля в діелектричних структурах. Отримані зручні для розрахунків співвідношення, які дозволяють визначати розподіл електричного поля, що утворюється накопиченням об'ємним зарядом в діелектричних плівках з різними способами металізації поверхні.*

**Ключові слова:** діелектричні плівки, накопичений заряд, металізація поверхні

*Ситник О.О., Самойлик А.В., Кищенко Я.І. Математическое моделирование электрического поля в диэлектрических структурах. Получены удобные для расчетов соотношения, которые позволяют определить распределение электрического поля, создаваемого накопленным объемным зарядом в диэлектрических пленках с разными способами металлизации поверхности.*

**Ключевые слова:** диэлектрические плёнки, накопленный заряд, металлизация поверхности

*Sitnik O., Samoilik A., Kishenko Ja. Mathematical modeling of the electric field in dielectric structures. Were obtained suitable for the calculation formulas, which determine the distribution of the electric field generated by the accumulated space charge in dielectric films with different ways of metallization surface.*

**Key words:** dielectric films, accumulated charge, the surface metallization

УДК 621.3.09:004.942

## **РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ КРУГЛОГО ХВИЛЕВОДА З ПРЯМОКУТНОЮ МЕТАЛЕВОЮ ВСТАВКОЮ**

**Сидорук Ю.К. Довгань В.М.**

При проектуванні НВЧ пристроїв у більшості випадків необхідно знати основні параметри ліній передачі, такі як: фазова швидкість, фазова постійна, довжина хвилі в хвилеводі, хвильовий опір, критичну довжину хвилі та інші. Для стандартних ліній передачі, що мають просту форму попереч-

ного перетину, існують аналітичні вирази, за допомогою яких вказані параметри легко розраховуються, але для ліній з складною формою поперечного перетину одержати аналітичні вирази або дуже складно, або взагалі неможливо. У таких випадках доводиться звертатися до числових методів, які дають задовільні результати і можуть бути реалізовані на доступних електронних обчислювальних засобах.

### Постановка задачі.

Маємо круглий хвилевод з прямокутною металеву пластинкою, розташованою в центрі хвилевода, рис. 1, в якому  $D$  – внутрішній діаметр круглого хвилевода;  $h$  – висота металеву пластинки;  $T$  – ширина металеву пластинки. Припускається, що стінки хвилевода і поверхня металеву пластинки мають нескінченно велику провідність. Область існування електромагнітного поля має дві площини симетрії горизонтальну і вертикальну. Граничні умови сформульовані нижче та відтворені на рис. 2.

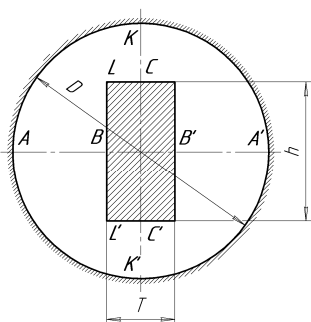


Рис. 1. Круглий хвилевод з прямокутною металеву пластинкою, розташованою в центрі хвилеводу

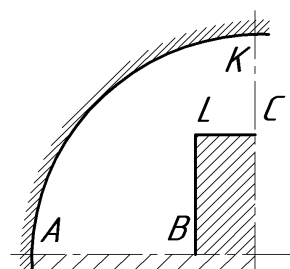


Рис. 2. Область розрахунку параметрів хвилевода

Необхідно визначити: фазову швидкість –  $V_\phi$ , фазову постійну –  $\beta$ , довжину хвилі в хвилеводі –  $\Lambda_{\text{хв}}$ , хвильовий опір –  $Z_{\text{хв}}$ , найбільшу критичну довжину хвилі  $H - \lambda_{\text{кр}}^H$ , вектор  $E$  якої на осях симетрії хвилевода орієнтований вертикально, в залежності від розмірів металеву пластинки відносно діаметра хвилевода.

Щоб виключити появу хвилі  $T$ , яка через двозв'язність граничних умов може поширюватись в даному хвилеводі, вважається, що для хвилі  $H$  з вертикальною поляризацією горизонтальна площина симетрії є ідеальною електричною стінкою, тобто має нескінченно велику провідність.

Дана задача має практичне значення в тих випадках, коли в круглому хвилеводі необхідно мати дві ортогонально поляризовані електромагнітні хвилі  $H_{11}$  з різними основними параметрами.

### Вибір методу розрахунку

Очевидно, що простого (аналітичного) методу розв'язку поставленої задачі не існує, тому необхідно застосувати числовий метод. Серед відомих числових методів розв'язку внутрішніх задач електродинаміки найчастіше

використовуються три: метод інтегральних рівнянь, скінченних різниць та скінченних елементів. В даному випадку доцільно вибрати останній - метод скінченних елементів. Перевага даного методу перед попередніми: він глибоко розроблений методично, при його використанні можна врахувати реальні параметри матеріалів, наявність джерел живлення випромінювання тощо; існують перевірені на практиці і доступні програми розв'язку електродинамічних задач і розрахунків параметрів електромагнітних хвиль.

Використання методу скінченних елементів забезпечує високий ступінь універсальності числових алгоритмів, які досить ефективні для широкого кола задач від аналізу хвилеводних і стрічкових структур до моделювання антен і складних невзаємних пристроїв, що містять гіротропні середовища.

### Розв'язок задачі та аналіз результатів розрахунку

В даному випадку розглядається регулярний хвилевод, в якому основною хвилею є електромагнітна хвиля  $H$ , що має найменшу критичну частоту  $f_{кр}$  (найбільшу критичну довжину хвилі  $\lambda_{кр}$ ), тому дана задача зводиться до розв'язку однорідного рівняння Гельмгольца [1]:

$$\Delta_{\perp} H_z + (k - \beta) H_z = 0, \quad (1)$$

де  $\Delta_{\perp} = \partial/\partial x^2 + \partial/\partial y^2$  - поперечний лапласіан;  $z$  - подовжня координата;  $k$  та  $\beta$  - фазові постійні в вільному просторі та хвилеводі відповідно.

Так як  $AA'$  є лінією горизонтальної симетрії і ідеальною електричною стінкою, а  $KK'$  вертикальною лінією симетрії і магнітною стінкою, то область, в якій розраховується електромагнітне поле може бути обмежена контуром  $ABLCKA$ , рис. 2. Границя на контурі  $KABLC$  має нескінченно велику провідність, відрізок  $CK$  - магнітна стінка.

Для числового розв'язку рівняння (1) з граничними умовами рис. 2. використовувалась програма Ansoft HFSS [2]. Використовуючи Ansoft HFSS можна з високою точністю розрахувати електричні і магнітні компоненти електромагнітного поля, зовнішні параметри НВЧ багатополісників, матриці розсіяння, матриці імпедансів і адмітансів, а тому HFSS може бути інтегрована в інші програми проектування. Розраховані S – параметри можуть використовуватись в програмах аналізу лінійних і нелінійних пристроїв, зокрема, у програмі Microwave Office, Serenade Ansoft або ADS. HFSS повністю сумісний з платформою Ansoft Designer, яка призначена для наскрізного проектування радіоелектронних систем.

Всі розрахунки виконувалися в відносних величинах. Розміри пластинки задавалися відносно діаметру хвилевода  $h/D$  та  $T/D$ , частота сигналу відносно критичної частоти порожнього круглого хвилеводу  $f/f_{кр}$ , одержаний

результат в  $\lambda_0/\Lambda_{хв}$  та  $\lambda_{кр1}/\lambda_{кр}$ , де  $\lambda_0$  - довжина хвилі в вільному просторі

торі на частоті  $f$ ,  $\Lambda_{\text{хв}}$  - довжина хвилі в круглому хвилеводі з металевою пластинкою на тій же частоті  $f$ ,  $\lambda_{\text{кр}}$  - критична довжина хвилі типу  $H_{11}$  порожнього круглого хвилеводу,  $\lambda_{\text{кр}1}$  - критична довжина хвилі  $H_{11}$  - в круглому хвилеводі з металевою пластинкою, площина поляризація якої співпадає з площиною пластинки. Результати розрахунків приведені на графіках рис. 3 ÷ 6.

На рис. 3 та рис. 4 приведені залежності  $\lambda_0/\Lambda_{\text{хв}}$  від  $h/D$  при трьох фіксованих значеннях  $T/D$ : для  $f/f_{\text{кр}} = 1,022$  (хвилевод докритичний) рис.3 та для  $f/f_{\text{кр}} = 0,978$  (хвилевод закритичний) рис. 4. Очевидно, що внесена в докритичний хвилевод прямокутна металева пластинка суттєво впливає на параметри електромагнітної хвилі  $H_{11}$ , площина поляризації якої співпадає з площиною пластинки.

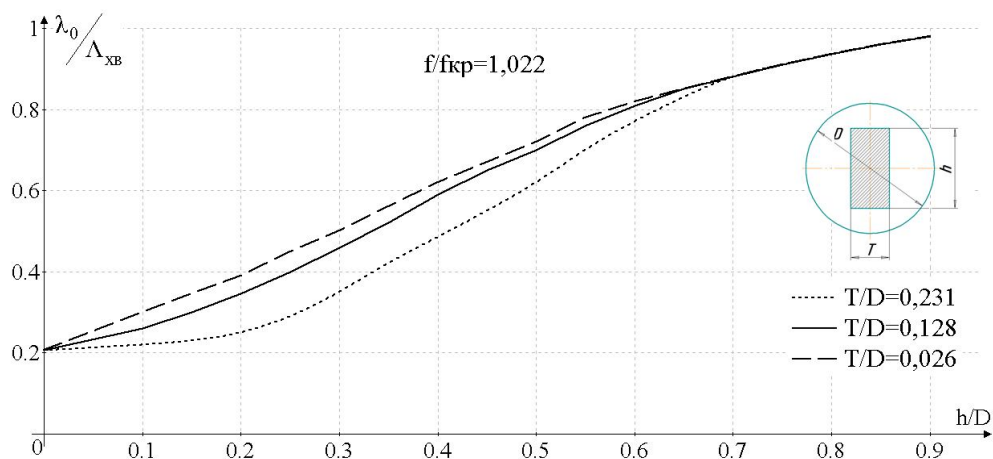


Рис. 3

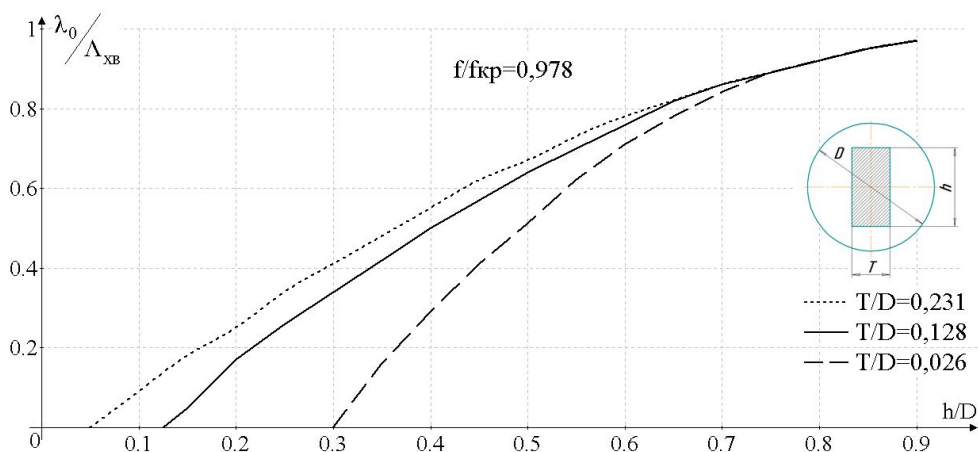


Рис. 4

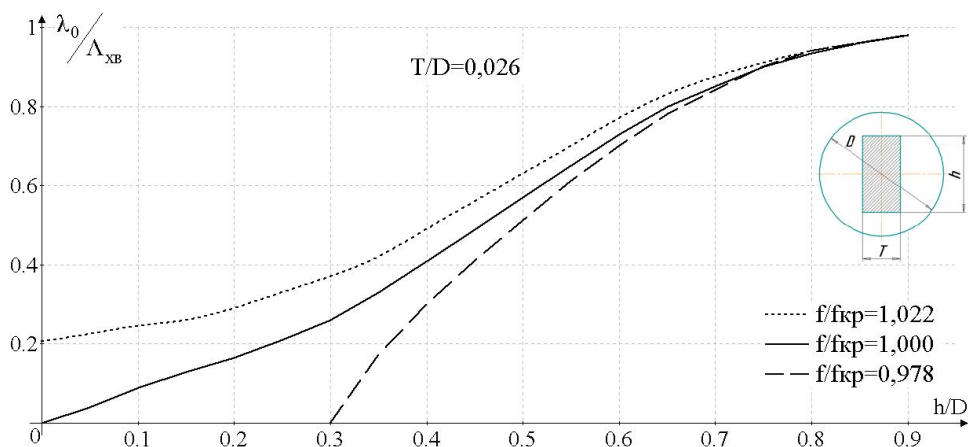


Рис. 5

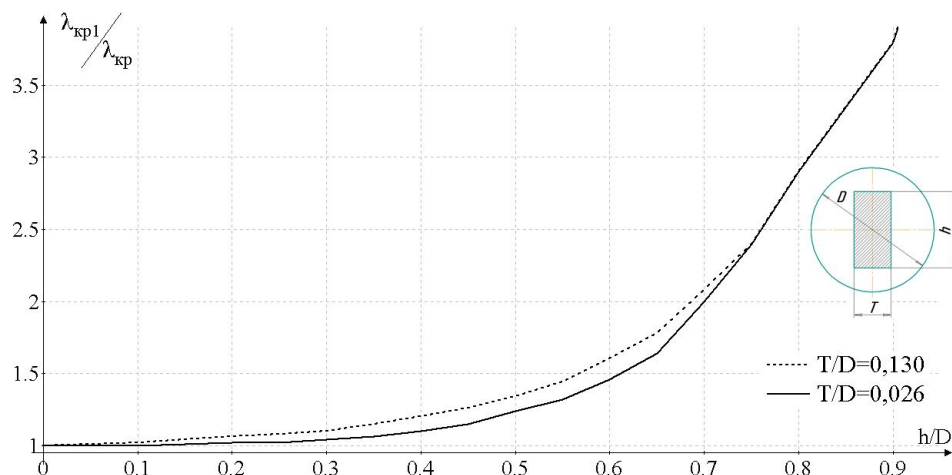


Рис. 6

Параметр  $T$  (товщина пластинки) на зміну  $\Lambda_{\text{XB}}$  впливає мало. В зоні майбільшого впливу,  $h/D = 0,3 \div 0,5$ , зміна  $T/D$  від 0,026 до 0,231 (в 8,88 разів)  $\lambda_0/\Lambda_{\text{XB}}$  збільшується, приблизно, в 1,25 разів. Прямокутна металева пластинка, внесена в закритичний круглий хвилевод, змінює його властивості так, що при певних розмірах пластинки він стає докритичним і в ньому може поширюватись хвиля  $H_{11}$ , площина поляризації якої співпадає з площиною пластинки, рис. 4. В останньому випадку при  $h/D < 0,5$  параметр  $T$  значно більше впливає на  $\Lambda_{\text{XB}}$  ніж в попередньому, але при  $h/D > 0,5$  його вплив зменшується. Важливою особливістю кривих рис. 3 та рис. 4 є те, що при збільшенні  $h/D$  вони стають більш пологими, що розширює робочу смугу частот і послаблює вимоги на допуски при виготовленні пластинки в конкретних пристроях.

На рис. 5 приведені графіки  $\lambda_0/\Lambda_{\text{хв}}$  від  $h/D$  при різних фіксованих значеннях  $f/f_{\text{кр}} = 1,022, 1,000, 0,978$  (порожній круглий хвилевод докритичний, критичний і закритичний) для тонкої металевої пластинки  $T/D = 0,026$ . Суттєва різниця між ними спостерігається при  $h/D < 0,4$ , а при  $h/D > 0,6$  вони майже збігаються.

Важливими характеристиками є залежності  $\lambda_{\text{кр1}}/\lambda_{\text{кр}}$  від  $h/D$  для двох значень  $T/D = 0,026$  та  $0,130$ , в докритичному порожньому хвилеводі, рис.6. Тут також очевидна мала залежність  $\lambda_{\text{кр1}}$  від товщини пластинки. Зміна  $T/D$  в 5 разів (від 0,026 до 0,130) приведе до зміни  $\lambda_{\text{кр1}}$  максимум в 1,06 разів. При малих значеннях  $h/D$  (менше 0,4) критична довжина хвилі в хвилеводі з металевою пластинкою мало відрізняється від критичної довжини хвилі порожнього круглого хвилевода, але при  $h/D > 0,55$  різко зростає.

### Висновки:

1. Прямокутна металева пластинка, розташована в центрі круглого докритичного і критичного хвилевода без металевої пластинки збільшує його критичну довжину хвилі (зменшує критичну частоту) для хвилі  $H_{11}$ , площа поляризації якої співпадає з площиною пластинки, а закритичний круглий хвилевод без пластинки перетворює в докритичний.

2. Прямокутна металева пластинка, розташована в докритичному без пластинки круглому хвилеводі, може бути використана для диференціації параметрів електромагнітних хвиль  $H_{11}$ , поляризованих в площині пластинки та в площині перпендикулярній площині пластинки, а в закритичному без пластинки круглому хвилеводі для фільтрації хвилі  $H_{11}$ , поляризованої перпендикулярно до площини пластинки.

3. Для практичного використання в НВЧ пристроях доцільно вибрати відносну висоту пластинки  $h/D$  в межах  $0,55 \div 0,75$ , а товщину  $T$ , при  $T/D \ll 1$ , виходячи з конструктивної доцільності.

### Література

1. Сильвестр П., Феррари Р. „Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков”, М., „Мир”, 1986. – 226 с.
2. Банков С.Е., Курушин А.А. „Проектирование СВЧ устройств и антенн с Ansoft HFSS”, М., 2009. – 736 с.

3. Сабоннадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР: Пер. с франц. — М.: Мир, 1989. — 190 с

4. Александров А.К., Ячев И.С., Маринова И.Й., Рыжов С.Ю. „Автоматизированный расчет поля электрических аппаратов методом вторичных источников” М., Издательство МЭИ, 1994, с. 4-5.

*Сидорук Ю.К. Довгань В.М. Розрахунок параметрів круглого хвилевода з прямокутною металевою вставкою. Розраховані і проаналізовані основні параметри електромагнітної хвилі  $H_{11}$  в круглому хвилеводі з прямокутною металевою пластинкою в випадках: коли круглий хвилевод без металевої пластинки для хвилі  $H_{11}$  докритичний, критичний і закритичний. Для розрахунків використовувався метод скінченних елементів і програма Ansoft HFSS.*

**Ключові слова:** круглий хвилевод, металева вставка, метод скінченних елементів

*Сидорук Ю.К. Довгань В.М. Расчет параметров круглого волновода с прямоугольной металлической вставкой. Рассчитаны и проанализированы основные параметры электромагнитной волны в круглом волноводе с прямоугольной металлической пластинкой в случаях: когда круглый волновод без металлической пластинки для волны  $H_{11}$  докритический, критический и закритический. Для расчетов использовался метод конечных элементов и программа Ansoft HFSS.*

**Ключевые слова:** круглый волновод, прямоугольная металлическая вставка, метод конечных элементов

*Sydoruk Yuriy K. Dovgan Vitally M. Calculations of circular waveguide with a rectangular metal insert. Calculated and analyzed the basic parameters of electromagnetic wave in a circular waveguide with a rectangular metal plate in the following cases: when the circular waveguide without metal plate for a  $H_{11}$  wave of subcritical, critical and supercritical. For calculations was used a finite element method and Ansoft HFSS program.*

**Keywords:** circular waveguide, metal insert, finite element method

УДК 621.373.12:621.396.61:621.396.62

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСОБІВ ЗМЕНШЕННЯ ФАЗОВИХ ШУМІВ ТРАНЗИСТОРНИХ ГЕНЕРАТОРІВ НВЧ

*Коцержинський Б.О.*

Огляд сучасних наукових публікацій показує, що продовжується інтенсивне вивчення виникнення фазових шумів (ФШ) у транзисторних генераторах НВЧ та пошук засобів зменшення їх рівня, тому що шуми суттєво впливають на ефективність систем зв'язку та використання частотного діапазону. При розробці генераторів мінімізація ФШ є першочерговою проблемою. Джерелами шуму є білий шум пасивних компонентів та шум транзисторів.

Рекомендації щодо зменшення рівня ФШ транзисторних генераторів залежать від моделей генератора та транзистора (лінійна або нелінійна),