

## РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ПОЛЯРИЗАТОРА ДЛЯ РОБОТИ В КА-ДІАПАЗОНІ

У статті розглянуті проблеми конструювання поляризаторів на основі хвилеводів круглого перетину для роботи в Ка-діапазоні. Проведено аналіз існуючих рішень з конструктивно-технологічної точки зору. На підставі зроблених висновків запропонована більш технологічна конструкція поляризатора, для якої проведено розрахунок основних конструктивних розмірів. Для перевірки запропонованого рішення виготовлений дослідний взірець поляризатора і проведено дослідження його характеристик, які підтвердили правильність теоретичних припущень.

Експериментально отримані характеристики підтверджують можливість застосування запропонованої конструкції для побудови високотехнологічних поляризаторів Ка-діапазону та правильність аналітичних виразів для визначення конструктивних розмірів. Подальшим розвитком запропонованого рішення, може бути аналіз і знаходження необхідних аналітичних співвідношень між конструктивними розмірами стрижневої і діелектричної структури з метою розширення робочого діапазону поляризатора.

**Ключові слова:** поляризатор, коефіцієнт еліптичності, хвилевід круглого перетину, робота в діапазоні Ка, експериментальна модель поляризатора.

S. DUDA, H. KHYMYCH

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

## ELABORATION OF THE POLARIZER'S CONSTRUCTION FOR WORK IN KA-RANGE

The problems of polarizer's construction over the basis of the circular waveguide for a work in Ka – range are highlighted in the article. The purpose of the article is to establish the possibility of using the proposed design for the construction of high-tech Ka-band polarizers and to prove the correctness of analytical expressions for determining the structural dimensions by experimentally obtained characteristics. The analysis of the current decisions from the point of view of construction and technology is held. On the conclusion had been drawn more technological polarizer's construction with the calculation of the main constructive sizes is proposed.

Theoretical principles of construction and calculation of structural dimensions of the C and Ku ranges polarizers' phase-shifting sections are covered in detail in the works of modern researchers and tested on real devices. However, while constructing AFT elements designed to operate in higher frequency operating bands, such as the Ka – band (20/30 GHz), there are certain difficulties, the solution of which continues.

In order to check the proposed decision experimental model of polarizer was made and investigation of the main characteristics corroborating the right theoretical assumption was held. For a practical study of the proposed design, a mock-up of a polarizer based on a round waveguide with an inner diameter of 11 millimeters was made. In the prototype, the rod structure was implemented in the form of five pairs of adjusting screws with a diameter of one millimeter. The final length of the polarizing plate, taking into account the smooth transitions designed to align the plate with the waveguide, was defined as the sum of the lengths of its regular part and one smooth transition multiplied by 0.9.

The experimentally obtained characteristics confirm the possibility of using the proposed design for the construction of high-tech Ka-band polarizers, and the correctness of analytical expressions for the determining the structural dimensions. A further development of the proposed solution may be the analysis and finding the necessary analytical relationships between the structural dimensions of the rod and dielectric structures in order to expand the operating range of the polarizer.

**Key words:** polarizer, elliptical ratio, circular waveguide, a work in Ka – range, experimental model of polarizer.

### Постановка проблеми

Збільшення вимог до інформаційного ресурсу сучасних супутникових каналів зв'язку визначає необхідність в створенні випромінюючих систем дзеркальних антен, що працюють на більш високих частотах і в більш широких смугах частот як на прийом, так і на передачу. Для збільшення пропускної спроможності каналів зв'язку на сучасних супутниках також ставиться вимога щодо використання сигналів з ортогональною поляризацією як на прийом, так і на передачу. Крім того, що сучасні опромінюючі системи повинні працювати в широкій смузі частот із сигналами різної поляризації, необхідно також, щоб опромінювач мав малі масогабаритні показники.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні опромінюючі системи складаються з трьох основних компонентів, а саме: опромінювача, поляризатора, ортомодового селектора. До компонентів частотно поляризаційної обробки сигналу можливо віднести поляризатор і ортомодовий селектор. Поляризатор – пристрій, що забезпечує первинну поляризаційну обробку сигналів, що приймаються. У випадку сигналів кругової поляризації відбувається перетворення останніх у сигнали з лінійною поляризацією, а у випадку сигналів з лінійною поляризацією є можливість зміни орієнтації їх площин.

Ортомодовий селектор – пристрій, що забезпечує подальшу частотну і поляризаційну селекцію сигналів в окремі канали [1]. Фактично ортомодовий селектор є пасивним хвилеводним розгалужувачем [2; 3], функцією якого є частотна і поляризаційна селекція сигналів, отриманих антеною [4; 5]. З врахуванням тенденції до поляризаційного ущільнення каналів зв'язку значною проблемою постає задача досягнення високих значень крос-поляризаційної розв'язки. Вдалі приклади технічних рішень таких задач є в С і Ku частотних діапазонах, а у вирішенні подібних задач в Ка діапазоні виникають певні труднощі в досягненні необхідних значень крос-поляризаційної розв'язки.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми**

Теоретичні принципи побудови і розрахунку конструктивних розмірів фазозсувних секцій поляризаторів С і Ку діапазонів докладно висвітлені в працях сучасних дослідників [1–4], і перевірені на реальних пристроях, які знайшли застосування. Однак, при конструюванні елементів АФТ, призначених для роботи в більш високочастотних робочих діапазонах, наприклад Ка – діапазоні (20/30 ГГц), при конструюванні подібних пристроїв, виникають певні труднощі, вирішення яких триває.

**Мега статті.** Встановити можливість застосування запропонованої конструкції для побудови високотехнологічних поляризаторів Ка-діапазону, та правильність аналітичних виразів для визначення конструктивних розмірів шляхом експериментально отриманих характеристик.

**Виклад основного матеріалу**

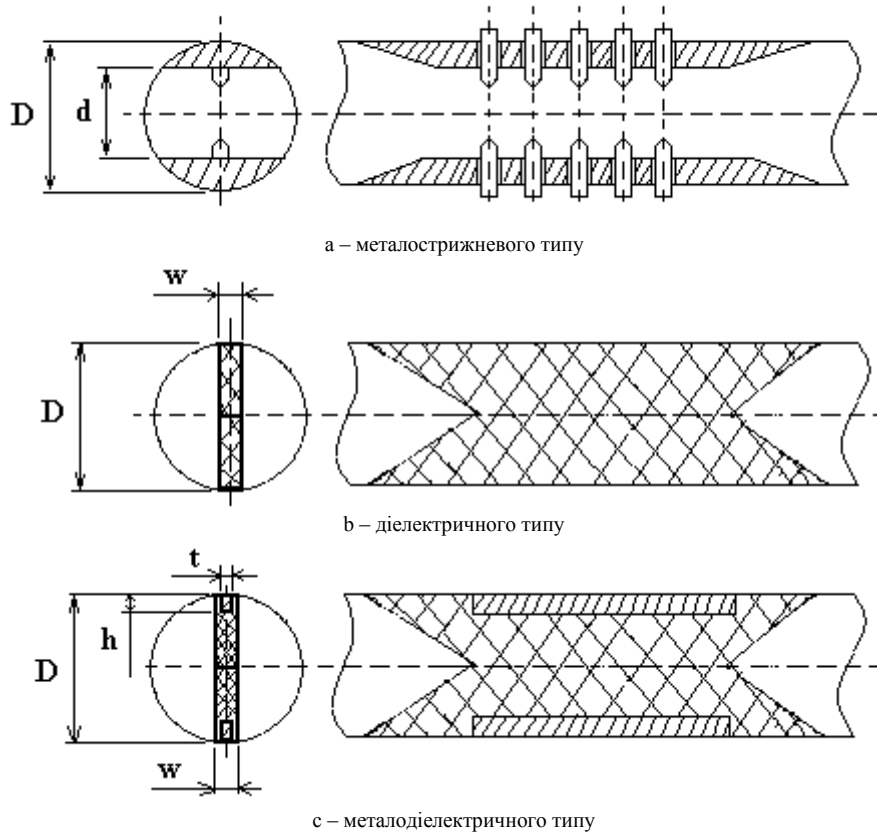
В антенно-фідерних трактах антенних систем (АС), для поляризаційної обробки сигналів, широко застосовуються поляризатори на основі хвильоводів круглого сечення. Як відомо, такі пристрої конструктивно є відрізком хвильоводу круглого сечення, в якому під кутом 45 градусів до площини поляризації падаючої хвилі, розташовані певні поздовжні неоднорідності, які створюють фазовий зсув між складовими електричного поля, відповідно паралельними і перпендикулярними до площини неоднорідностей. В загальному випадку, значення фазового зсуву в поляризаторах визначається як:

$$\Theta = (\beta_{\parallel} - \beta_{\perp})l, \tag{1}$$

де  $\beta_{\parallel}$  – фазові постійні складових вектора Е;  $l$  – довжина фазозсувної секції.

Залежно від типу і призначення АС, фазовий зсув між складовими має набувати значення 90 градусів (кругова поляризація), чи 180 градусів (лінійна поляризація). Основна задача, яка ставиться при розробці подібних пристроїв, зводиться до компенсації дисперсії фазового зсуву в заданій смузі робочих частот, що впливає з заданих значень коефіцієнта еліптичності, чи крос-поляризаційної розв'язки АС.

На даний момент, в антенно-фідерних трактах (АФТ), найбільше застосування знайшли конструкції поляризаторів метало-стрижневого, діелектричного і метало – діелектричного типу, схематичні зображення яких наведені на рис. 1.



**Рис. 1. Поляризатор металодіелектричного типу**

Принципи побудови і розрахунку конструктивних розмірів фазозсувних секцій наведених типів поляризаторів, достатньо докладно пророблені теоретично [1–4], і провірені на реальних пристроях, які знайшли застосування в різних робочих діапазонах, на частотах від 4 до 14 ГГц. Однак, при конструюванні елементів АФТ, призначених для роботи в більш високочастотних робочих діапазонах, наприклад Ка – діапазоні (20/30 ГГц), при конструюванні пристроїв, виникають певні складності пов'язані з наступними

чинниками: суттєво зростають вимоги до необхідної точності виготовлення елементів; зменшуються геометричні розміри самих елементів; зростає вплив неоднорідності фізичних і геометричних характеристик матеріалів на радіотехнічні характеристики пристроїв.

З огляду на зазначені чинники, проведено аналіз особливостей конструктивно – технологічної реалізації наведених на рис. 1 конструкцій поляризаторів в частотному діапазоні 20/30 ГГц. Попередній розрахунок основних конструктивних розмірів фазозсувних секцій дає наступні результати:

– виходячи з умови роботи на основному типу хвилі для круглого хвилеводу, вибираємо внутрішній діаметр хвилеводів 11 мм;

– оптимальне співвідношення між фазовим зсувом, що створюється звуженою частиною хвилеводу рис. 1, а, і стрижневою структурою, визначений як:

$$\left(\frac{D-d}{2}\right)/R \approx \quad , \quad (2)$$

де  $R$  – радіус хвилеводу, визначає розмір  $d$  рівним приблизно 8 мм.

Відповідно товщина звужуючої пластини не має перевищувати одного міліметра;

– товщину діелектричної пластини рис. 1,  $b$  обираємо за умови виконання співвідношення  $w \ll \lambda$ , яка визначає наближення до нуля коефіцієнтів взаємного зв'язку між найближчими до основного типами хвиль  $H_{mn}, E_{mn}$ . Відповідно до вибраного діаметра хвилеводу, товщина діелектричної пластини має не перевищувати двох міліметрів;

– умови визначення товщини діелектричної пластини є вірними і для конструкції поляризатора наведеної на рис. 1,  $c$  видно, що при  $w \leq 2i\lambda$ , товщина металевої пластини не має перевищувати один міліметр.

Аналіз отриманих результатів показує, що застосування конструкцій поляризаторів метало-стрижневого і метало-діелектричного типів, в заданому частотному діапазоні, є досить проблематичним. Останнє пов'язано з тим, що технологічно, повздовжні металеві неоднорідності необхідно впаювати в основний хвилевод, а з огляду на отримані конструктивні розміри, дотримання необхідних значень допусків на паралельність площин, співвісність і т.п., є якщо неможливою, то достатньо складним технологічним завданням.

На цьому фоні, найбільш придатною для застосування, виглядає конструкція поляризатора діелектричного типу. Основною технологічною проблемою, при реалізації подібної конструкції, є механічна фіксація пластини всередині хвилеводу. З метою мінімізації активних втрат, діелектричну пластину виконують з фторопласту. Однак, визначена товщина пластини і фізичні властивості самого матеріалу, не дозволяють забезпечити надійну механічну посадку пластини в хвилеводі, що визначає необхідність застосування технологічного процесу вклеювання пластини. Для забезпечення останнього, попередньо необхідно провести складну фізико-хімічну обробку фторопластової пластини, що з огляду на шкідливість технологічних процесів, можливо всього на декількох підприємствах України. З радіотехнічної точки зору, до недоліків конструкції поляризаторів діелектричного типу слід віднести відносну вузькосмуговість останнього, як наслідок відсутності в конструкції поляризатора додаткових елементів компенсації дисперсії фазового зсуву, що створюється діелектричною пластинною в робочому діапазоні частот.

З метою вирішення наведених технологічних складностей, та покращення радіотехнічних характеристик, нами пропонується модифікувати поляризатор діелектричного типу. Умовно, конструкцію, що пропонується, можливо класифікувати, як поляризатор діелектрично-стрижневого типу. Схематичний вигляд запропонованої конструкції наведений на рис. 2.

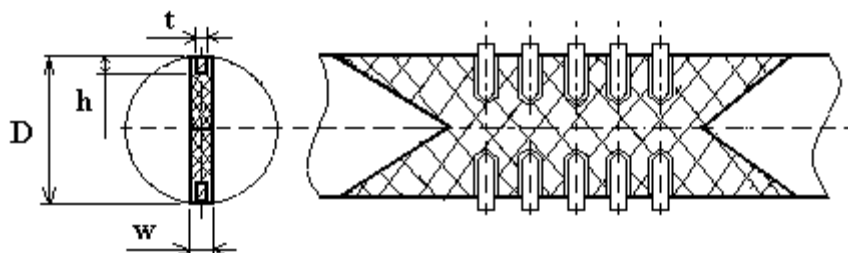


Рис. 2. Поляризатор діелектрично-стрижневого типу

Очевидно, що з технологічної точки зору, запропонована конструкція, дозволяє забезпечити надійну механічну фіксацію пластини в хвилеводі, і не потребує значної технологічної підготовки при виготовленні. З радіотехнічної точки зору, принцип побудови фазозсувної секції в конструкції, що пропонується, полягає в поєднанні фазового зсуву, що створюється діелектричною пластинною, і рядом стрижнів в вигляді налагоджувальних гвинтів.

Незважаючи на виникнення необхідності проведення налагоджувальних робіт, і відповідне зростання трудомісткості, прийняте конструкторське рішення дозволяє проводити оперативну перебудову характеристики коефіцієнта еліптичності по діапазону, а також компенсувати можливі відмінності фізичних і геометричних властивостей фторопластових пластин з різних партій. Враховуючи наявність налагоджувальних

гвинтів, розрахунок лінійного розміру діелектричної пластини, що визначається виразом (1), необхідно проводити для значення фазового зсуву трохи меншого, за необхідний для даного типу поляризатора. Наприклад, для 90 градусного поляризатора, значення фазового зсуву, що створюється діелектричною пластинною, має складати порядку 80 градусів.

При цьому, у випадку часткового заповнення хвилеводу діелектриком, фазові постійні відповідних складових вектора  $E$  електричного поля, можливо визначити наступним чином:

$$\beta_{\parallel} = \sqrt{\epsilon_{\parallel}^{\text{ефект}} - \chi^2}, \tag{3}$$

де  $\kappa_{\parallel} = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon_{\parallel}^{\text{ефект}}}}{\lambda_0}$  – хвильові числа складових вектора  $E$ ;  $\chi = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{крит}}}$  – критичне хвильове число

основного типу хвилі  $\dot{I}_{11}$ ;  $\epsilon_{\parallel}^{\text{ефект}}$  – ефективні еквівалентні відносні діелектричні проникливості паралельної і перпендикулярної до площини пластини складових вектора  $E$ ;  $\lambda_0$  – довжина робочої хвилі.

Значення відносної діелектричної проникливості знаходяться на підставі методу хвильових рівнянь [5]. При цьому, вирішується система хвильових рівнянь для декількох типів хвиль  $H_{m,n}, E_{m,n}$  в хвилеводі з врахуванням взаємного зв'язку між ними, що є наслідком присутності діелектричної пластини. Для відносно тонких пластин, систему рівнянь можливо вирішувати в діагональному, чи нульовому наближенні. Так як зазначена умова дотримана при виборі товщини пластини поляризатора, значення ефективної діелектричної проникливості відповідних складових вектора  $E$ , можливо визначати за наступними виразами [3]:

$$\epsilon_{\parallel}^{\text{ефект}} = 1 + (\epsilon_m - 1)S_{\epsilon} / S + [(\epsilon_m - 1) / \pi] \sin(\pi S_{\epsilon} / S) \tag{4}$$

$$\epsilon_{\perp}^{\text{ефект}} = 1 + (\epsilon_m - 1)S_{\epsilon} / S, \tag{5}$$

де  $\epsilon_m$  – значення діелектричної проникливості матеріалу пластини (для фторопласту  $\epsilon_m = 2,25$ );

$S_{\epsilon}, S$  – площа січень діелектричної пластини і хвилеводу, відповідно.

З використанням наведених аналітичних виразів, була визначена довжина фторопластової пластини товщиною два міліметра необхідна для отримання фазового зсуву між ортогональними складовими вектора  $E$ , який би дорівнював 80 градусів на частоті 20 ГГц. З огляду на те, що налагоджувальні гвинти стрижневої структури розташовані в хвилеводній структурі частково заповненій діелектриком, то відстань між останніми була визначена, як  $\lambda_{\parallel} / 4$ , де  $\lambda_{\parallel}$  – довжина хвилі для складової  $E_{\parallel}$  вектора  $E$ .

**Результати експериментальних досліджень.** На підставі отриманих результатів, для практичного дослідження запропонованої конструкції, був виготовлений макетний взірець поляризатора на основі круглого хвилеводу з внутрішнім діаметром 11 міліметрів (рис. 3).



Рис. 3. Дослідний зразок поляризатора

У дослідному зразку, стрижнева структура була реалізована в вигляді п'яти пар налагоджувальних гвинтів діаметром один міліметр. Кінцева довжина поляризаційної пластини, з врахуванням плавних переходів призначених для узгодження пластини з хвилеводом, була визначена, як сума довжин її регулярної частини і одного плавного переходу помноженого на 0,9. На рис. 4 наведені результати вимірювання коефіцієнта еліптичності, а на рис. 5 – результати вимірювання КСХН, дослідного зразка поляризатора.

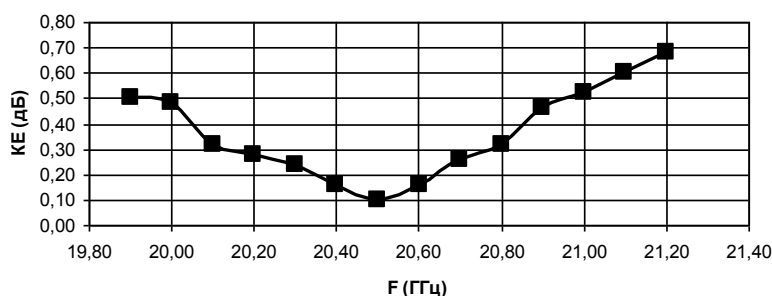


Рис. 4. Результати вимірювання коефіцієнт еліптичності поляризатора

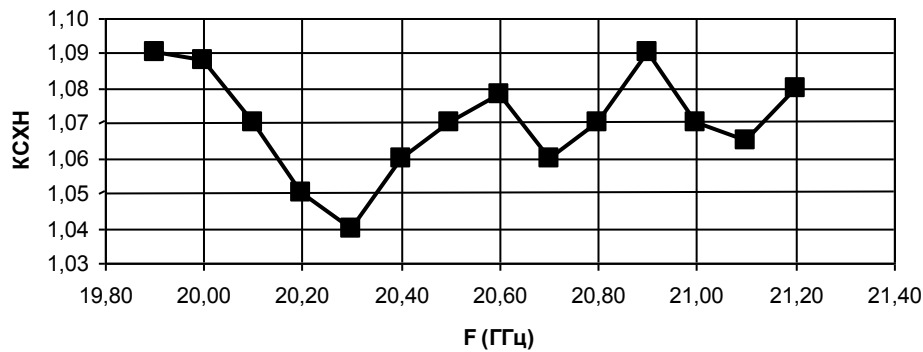


Рис. 5. Результати вимірювання КСХН поляризатора

**Висновки і перспективи.** Експериментально отримані характеристики підтверджують можливість застосування запропонованої конструкції для побудови високотехнологічних поляризаторів Ka-діапазону, та правильність аналітичних виразів для визначення конструктивних розмірів.

Подальшим розвитком запропонованого рішення, може бути аналіз і знаходження необхідних аналітичних співвідношень між конструктивними розмірами стрижневої і діелектричної структур з метою розширення робочого діапазону поляризатора.

### Література

1. Адаменко Є. О. Поляризатор із поздовжньою перегородкою. «Радіоелектроніка в XXI столітті» : матеріали II Всеукраїнської наук.-техн. конф. студентів та аспірантів (Київ, 14–16 травня 2019 р.). Київ, 2019. С. 9-11.
2. Демин Д. А., Чубинский Н. П. Облучатель с двумя ортогональными круговыми поляризациями. Журнал радиоэлектроники. 2014. № 6. С. 11–23.
3. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. Москва : Высш. шк., 1988. 435 с.
4. Спутниковая связь и вещание: справочник / под ред. Л. Я. Кантора. Москва: Радио и связь, 1997. 538 с.
5. Тузбеков А. Р., Гольберг Б. Х. Широкополосный волноводный поляризационный селектор для диапазона S с малым поперечным размером. Радиолокация и радиосвязь: материалы IV Всерос. конф. (Москва, 27 мая 2013г.). Москва: ИРЭ РАН, 2013. С. 76–82.

### References

1. Adamenko Ye. O. (2019) Poliaryzator iz pozdovzhnoiu perehorodkoiu [Polarizer with a longitudinal partition]. Proceedings of the «Radio elektronika v XXI stolitti» : materialy II Vseukrainskoi nauk.-tehn. konf. studentiv ta aspirantiv (Kyiv, May 14 – 16, 2019 r.). Kyiv, pp. 9-11.
2. Dēmin D. A., Chubinskiy N. P. (2014) Obluchatel' s dvumya ortogonal'nymi kru govymi polarizatsiyami [An irradiator with two orthogonal circular polarizations]. Zhurnal radioelektroniki, vol. 6, pp. 11–23.
3. Sazonov D. M. (1988) Antenny i ustroystva SVCH [Antennas and MWF devices]. Moscow: Vyssh. shk. (in Russian).
4. Kantor L.YA. (ed.) (1997) Sputnikovaya svyaz' i veshchaniye: spravochnik [Satellite communication and broadcasting: a handbook], Moskva: Radio i svyaz' (in Russian).
5. Tuzbekov A. R., Gol'berg B. KH. (2013) Shirokopolosnyy volnovodnyy polyarizatsionnyy selektor dlya diapazona S s malym poperechnym razmerom [Broadband waveguide polarizing selector for S band with small transverse dimension]. Proceedings of the Radiolokatsiya i radiosvyaz': materialy IV Vseros. konf. (Russia, Moscow, April 15–19, 2013). Moscow: IRE RAN, pp. 76–82.

С. П. ДУДА  
Г. П. ХИМИЧ

ORCID ID: 0000-0002-6615-7209  
ORCID ID: 0000-0001-5869-9342

OleksandraHorT@gmail.com

Рецензія/Peer review : 05.05.2021 р.

Надрукована/Printed : 30.06.2021 р.