

тю) серед всіх технічних об'єктів, всі процеси у них повинні розглядатися, як гіпервипадкові; тому й функціональні показники РЕЗ необхідно визначати, як векторні гіпервипадкові функції.

3. Методи проектування будь-якого технічного об'єкту, а у першу чергу РЕЗ, повинні бути побудовані на використанні математичного апарату теорії гіпервипадкових явищ.

4. Потрібно чітко уявляти, що під час проектування для кожного з функціональних показників РЕЗ буде одержана множина значень, яка визначається відповідним законом розподілу; межі, у яких знаходиться ця множина, також мають свої закони розподілу.

#### Література

1. Rivett P., Principles of model building. The construction of models for decision analysis, [Chichester] – 1972.
2. Лыков А.В. Теплообмен (Справочник). 2-е изд. М.: Энергия – 1978. – 480 с.
3. Горбань И.И. Теория гиперслучайных явлений. – Киев: НАНУ / Институт проблем математических машин и систем – 2007. – 184 с.
4. Горбань И.И. Представление физических явлений гиперслучайными моделями // Математичні машини і системи. – № 1, 2007. – с. 34 – 41.

*Зиньковський Ю.Ф., Уваров Б. М. Радіоелектронна апаратура як об'єкт теорії гіпервипадкових явищ. Розглянуті проблеми визначення показників функціонального призначення радіоелектронних засобів під час проектування на основі теорії гіпервипадкових явищ*

**Ключові слова:** теорія гіпервипадкових явищ, радіоелектронна апаратура,

*Zinkovskiy Yu.F., Uvarov B. M. Радіоелектронная апаратура как объект теории гиперслучайных явлений. Рассмотрены проблемы определения показателей функционального назначения радиоэлектронных средств при проектировании на основе теории гиперслучайных явлений*

**Ключевые слова:** теория гиперслучайных явлений, радиоэлектронная апаратура,

*Zinkovsky J.F., Uvarov B.M. The radioelectronic equipment as object the theories hyperbolic-accidental of the phenomena. The problems of definition of parameters of functional assignment radioelectronic apparatus are considered at designing on the basis of the theory hyperbolic-accidental of the phenomena*

**Keywords:** the theory hyperbolic-accidental of the phenomena, the radioelectronic equipment

УДК 691.391.052

## ПРОЕКТУВАННЯ ПРОФІЛЮ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ В ПЛАНАРНИХ МЕТАЛОДЕЛЕКТРИЧНИХ ХВИЛЕВОДАХ

*Левандовський В.Г.*

Головною спрямовуючою структурою багатьох пристроїв радіоелектроніки є тонкоплівковий хвилевід. Враховуючи високу вартість технологічного пошуку хвилеводів з потрібними для конкретних практичних потреб характеристиками, застосований в [1] метод, використовується для проектування профілю показника заломлення (ППЗ) в планарному металодіелектричному хвилеводі (МДХ) з оптимальними характеристиками. Застосування МДХ поширить функціональні можливості пристроїв.

### Постановка задачі

Плоский МДХ рис. 1 – необмежена по координаті  $y$  пластинка товщиною  $l$ . При  $x = 0$  розташовано металевий екран, а при  $x = l$  – однорідний діелектрик з діелектричною проникністю (ДП)  $\varepsilon_2$ . В поперечному напрямі хвилевід є неоднорідним і характеризується відносною ДП  $\varepsilon = \varepsilon(x)$ .

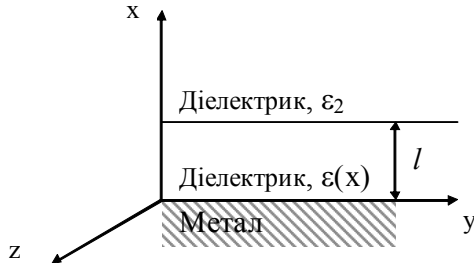


Рис.1.

Нормоване (в безрозмірних величинах) диференціальне рівняння, що визначає властивості ТЕ-хвиль в МДХ записується як

$$\frac{d^2 E(\xi)}{d\xi^2} + [p^2 - q(\xi)]E(\xi) = 0, \quad (1)$$

де  $E(\xi, p)$  відповідає розподілу поля моди, яка поширюється у хвилеводі,

$$p^2 = -V^2 \frac{\varepsilon_2 - \beta^2 / k^2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}; \quad V = kl\sqrt{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}; \quad q(\xi) = V^2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon(\xi)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}; \quad \xi = \frac{x}{l}$$

– безрозмірна координата;  $\varepsilon_1$  – довільне, але більше за  $\varepsilon_2$  значення ДП,  $\beta$  – стала поширення,  $k = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$  – хвильове число;  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  – діелектрична і магнітна сталі,  $\omega$  – кутова частота.

Умови на границі металу і діелектрика наступні:

$$E(0) = 0, \quad \left. \frac{dE(\xi)}{d\xi} \right|_{\xi=0} = 1, \quad E(\xi) \Big|_{\xi=1+0} = E(\xi) \Big|_{\xi=1-0}, \quad \left. \frac{dE(\xi)}{d\xi} \right|_{\xi=1+0} = \left. \frac{dE(\xi)}{d\xi} \right|_{\xi=1-0}. \quad (2)$$

Окрім цього, повинна виконуватись умова загасання поля моди, що поширюється, на нескінченності: при  $\xi \rightarrow \infty$ ,  $E(\xi) < M_1$ , де  $M_1$  – деяка мала величина. При  $p^2 < 0$  має місце хвильовий режим, так що  $k\sqrt{\varepsilon_2} < \beta < k\sqrt{\varepsilon_1}$ .

### Метод моделювання

У відповідності з методом розв'язку зворотної задачі розсіяння [1,2], розв'язок рівняння (1) з граничними умовами (2) визначається через розв'язок рівняння, яке описує поширення хвиль у певному МДХ з відомою функцією розподілу показника заломлення. В якості вихідного хвилеводу було обрано МДХ із ступінчастим профілем показника заломлення: з ДП  $\varepsilon_1$ , котрий обмежений при  $\xi = 0$  металевим екраном, а при  $\xi = 1$  – однорідним діелектриком з ДП  $\varepsilon_2$ . Рівняння, що описує поширення електромагнітних хвиль у такому МДХ, мають вигляд (при цьому граничні умови співпадають з (2)):

$$\frac{d^2 E_1(\xi)}{d\xi^2} + [v^2 + p^2]E_1(\xi) = 0, \quad \xi \in [0,1], \quad \frac{d^2 E_1(\xi)}{d\xi^2} + p^2 E_1(\xi) = 0, \quad \xi \in (1, \infty) \quad (3)$$

Визначення профілю діелектричної проникності в поперечному перерізі шуканого МДХ у відповідності з методом [2], потребує розв'язку інтегрального рівняння Гельфанда-Левітана

$$G(\xi, t) + \int_0^{\xi} K(\xi, y)G(y, t)dy + K(\xi, t) = 0, \quad (0 < y < t),$$

ядро котрого  $G(\xi, t)$ , за звичай, вводиться інтегралом Стілт'еса

$$G(\xi, t) = \int_0^{\infty} E_1(\xi, p)E_1(p, t)dp(p), \quad dp(p) = d\sigma(p) - d\sigma_1(p),$$

де  $d\sigma(p)$  – похідна спектральної функції рівняння, що описує хвильові процеси в проєктованому хвилеводі (1) і  $\sigma_1(p)$  – у вихідному хвилеводі (3)

$$d\sigma_1(p) = \begin{cases} \Phi(p)dp, & p \geq 0, \\ \sum_{i=1}^N C_i \delta(p - p_i)dp, & p \in (-v^2, 0), \end{cases}$$

$\Phi(p)$  – функція, що характеризує неперервну частину спектру,  $p_i$  – сталі поширення мод,  $N$  – число мод, що поширюються у вихідному хвилеводі на заданій частоті,  $C_i$  – нормувальні сталі

$$C_i = 2(V^2 + p_i^2) \left[ 1 - \frac{\sin(2\sqrt{V^2 + p_i^2})}{2(V^2 + p_i^2)} + \frac{\sin^2(V^2 + p_i^2)}{p_i^2} \right]^{-1}, \quad (i = 1, 2, \dots, N).$$

Відповідно,  $d\sigma(p) = \begin{cases} \Phi(p), & p \geq 0, \\ \sum_{i=1}^M B_i \delta(p - \tilde{p}_i)dp, & p \in (-v^2, 0), \end{cases}$  де  $M$  – число мод, що

поширюються на тій самій частоті в запроектованому хвилеводі. Нормувальні коефіцієнти  $B_i$  необхідно визначити. Оскільки  $\sigma_1(p)$  і  $\sigma(p)$  відрізняються тільки дискретною частиною, можна записати

$$\begin{aligned} G(\xi, p) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \sum_{i=1}^M B_i \delta(p - \tilde{p}_i) - \sum_{i=1}^N C_i \delta(p - p_i) \right] E_1(\xi, p)E_1(\zeta, p)dp = \\ &= \sum_{i=1}^M B_i E_1(\xi, \tilde{p}_i)E_1(\zeta, \tilde{p}_i) - \sum_{i=1}^N C_i E_1(\xi, p_i)E_1(\zeta, p_i). \end{aligned}$$

У відповідність з теорією розв'язку зворотної задачі розсіяння, функція зміни діелектричної проникності в поперечному перерізі запроектованого  $q(\xi)$  знаходиться за відомою формулою [2]

$$q(\xi) = -2 \frac{d}{d\xi} K(\xi, \xi). \quad (4)$$

Розподіл поля моди, що поширюється у шуканому хвилеводі  $E(\xi, p)$  визначається за допомогою оператора Повзнера-Левітана [2],

$$E(\xi, p) = E_1(\xi, p) + \int_0^{\xi} K(\xi, t)E_1(t, p)dt \quad (5)$$

Нормувальні коефіцієнти, що входять у вирази (4), (5) визначаються з допомогою наступного виразу [3],

$$\Gamma_i = \frac{\int_{\xi_1}^{\xi_2} [E(\xi, p_i)]^2}{\int_0^{\infty} E(\xi, p_i)^2} \quad i = 1, 2, 3, \dots, M,$$

який пов'язує значення коефіцієнта локалізації потужності і-тої моди з розподілом поля цієї моди в поперечному перерізі хвилеводу.

### Реалізація методу

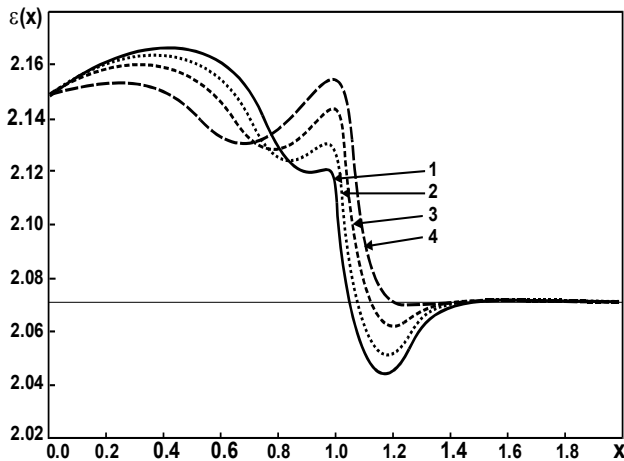


Рис. 2.

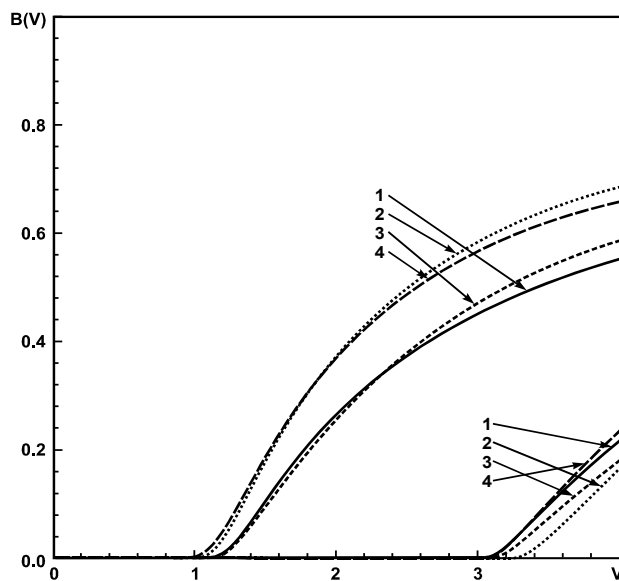


Рис. 3.

За допомогою запропонованого методу одержані параметри і характеристики запроєктованих одномодових МДХ, які мають на заданій нормованій частоті  $V$  задане значення фазової швидкості основної моди  $V_{ph}/c$  ( $c$  – швидкість світла у вільному просторі) і заданий коефіцієнт локалізації потужності. За вихідний взятий хвилевід із ступінчастим профілем показника заломлення. На рис. 2. зображені криві функцій діелектричної проникності запроєктованих хвилеводів. Розраховані чотири функції профілю із заданими значеннями коефіцієнта локалізації основної моди. На рис. 3 зображені дисперсійні криві основної і наступної найближчої мод, що поширюються в змодельованих МДХ (наведена залежність нормованої сталої поширення  $V$  від частоти). Номери кривих відповідають номерам профілів ДП змодельованих МДХ (рис. 1). Смуга частот одномодового режиму у порівнянні з вихідним хвилеводом значно збільшується.

На рис. 4 зображено залежність коефіцієнта локалізації потужності  $\Gamma$  основної моди від нормованої частоти  $V$  у змодельованих МДХ. Видно, що коефіцієнта локалізації потужності у порівнянні з вихідним хвилеводом значно збільшується. Всі криві нормовані до свого максимуму. Для перевірки методу був проведений модельний експеримент, який полягав у розв'язку

прямої задачі для одержаних хвильоводів. Результати показали розбіжність з вихідними даними на 0.15%.

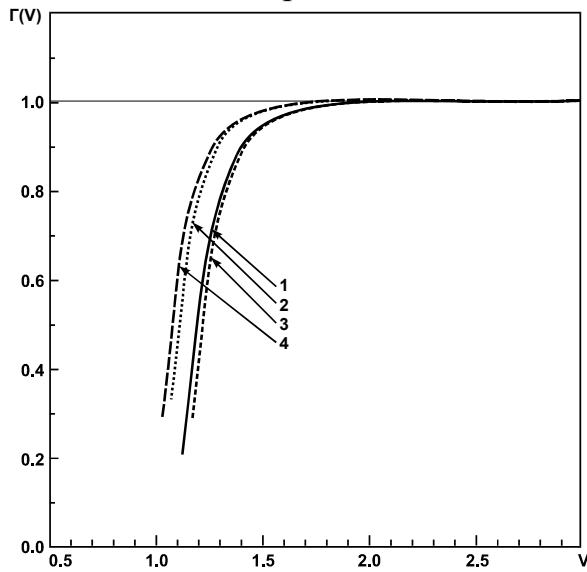


Рис. 4.

### Висновки

Запропоновано метод для проектування планарного металодіелектричного хвильоводу., використовуючи наперед задані його передавальні характеристики. Форма профілю показника заломлення конструюється для заданого значення коефіцієнта локалізації потужності моди електромагнітної хвилі, що поширюється на фіксованій частоті. Допускається одномодовий та

маломодовий режими. Цей метод дозволяє спростити технологічний пошук відповідного оптимального профілю показника заломлення

### Література

1. Левандовський В.Г. Метод проектування профілю показника заломлення у хвильоводі круглого поперечного перерізу // Вісник НТУУ «КПІ». Серія радіотехніка, радіоапаратобудування. – 2009. - Вип. 39. – С.98 – 103.
2. Гельфанд И.И., Левитан Б.М. Об определении дифференциального оператора по его спектральной функции. // Изв. АН СССР, серия математическая. 1951, № 4. – С. 309-313
3. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М. – Мир. – 1984. – 512с.

*Левандовський В.Г. Проектування профілю показника заломлення в планарних металодіелектричних хвильоводах. Проведено моделювання профілю показника заломлення у планарних металодіелектричних хвильоводах для одержання оптимальних параметрів.*

**Ключові слова:** металодіелектричний хвильовод, зворотна задача розсіяння, інтеграл Стілтьєса, поле електромагнітної хвилі

*Левандовский В.Г. Проектирование профиля показателя преломления в планарных металодиелектрических волноводах. Проведено моделирование профиля показателя преломления в планарных металодиелектрических волноводах.*

**Ключевые слова:** металодиелектрический волновод, обратная задача рассеяния, интеграл Стильеса, поле электромагнитной волны

*Levandovskyy V.G. Engineering of refraction index profile of planar metal-dielectric waveguide. Engineering of refraction index profile for planar metal-dielectric waveguide is performed.*

**Keywords:** metal-dielectric waveguide, propagation constant, inverse scattering problem, degenerate kernel, field of electromagnetic wave