

дають можливість створити на їх основі програмні модулі та використати останні у САПР оптимальних конструкцій РЕА.

#### Література

1. Горбань И.И. Представление физических явлений гиперслучайными моделями//Математичні машини і системи. – 2007. - № 1. – с. 34-41.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т1. М.: Наука, 1988. – 512 с.
3. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука. 1987.– 432с.
4. Хоменюк В.В. Элементы теории многоцелевой оптимизации. М.: Наука, 1983.
5. Бабаков И.М. Теория колебаний. М.: Наука. - 1968. – 560 с.
6. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов.— К.: Наукова думка, 1988. – 736 с.
7. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності.

Загальні вимоги.

*Уваров Б.М. Проектування та оптимізація конструкцій радіоелектронних засобів з гіпервипадковими макропоказниками. Розглянуті комплексні показники оптимальних конструкцій радіоелектронної апаратури, які відображають основні функціональні та конструктивні характеристики її пристроїв у вигляді системи критеріальних рівнянь, одержаних методами теорії подібності. Всі показники фізичних процесів і функціональні характеристики апарату подані як гіпервипадкові функції.*

**Ключові слова:** радіоелектронні засоби, оптимальні конструкції, гіпервипадкові функції

*Уваров Б.М. Проектирование и оптимизация конструкций радиоэлектронных средств с гиперслучайными макропоказателями. Рассмотрены комплексные показатели опти-мальных конструкций радиоэлектронной аппаратуры, отображающие основные функци-ональные и конструктивные характеристики её устройств в виде системы критериальных уравнений, полученных методами теории подобия. Все показатели физических процессов и функциональные характеристики аппарата представлены как гиперслучайные функции.*

**Ключевые слова:** радиоэлектронные средства, оптимальные конструкции, гиперслучайные функции

*Uvarov B.M. Designing and optimization of designs of radioelectronic devices with hyper-accidental macroindexes. The complex parameters of optimum designs of the radioelectronic equipment displaying basic functional and constructive characteristics of devices as system of the criterial equations received by methods of the theory of similarity are considered. All parameters of physical processes together with functional characteristics of the device are submitted as hyper-accidental of function.*

**Keywords:** radioelectronic equipment, optimal construction, hyper-accidental function

УДК 691.391.052

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОФІЛЮ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ ХВИЛЕВОДУ ЗА КОЕФІЦІЄНТОМ ЛОКАЛІЗАЦІЇ

*Левандовський В.Г.*

В сучасному виробництві постійно виникає потреба у зменшенні втрат при з'єднанні хвилеводу з пристроями інтегральної оптики (лазери, фільтри, модулятори та ін.). Висока ступінь локалізації потужності хвилеводних мод сприяє зменшенню втрат, пов'язаних із поглинанням в матеріалі оболонки, а також, на шерехатостях границі розділу середовищ. Однак, технологічний пошук відповідного профілю показника заломлення (ПЗ) і технологія виго-

товлення таких хвильоводів є досить дорогим процесом. Запропонована в даній роботі методика дозволяє уникнути дорогих технологічних пошуків і одержати розрахункові формули для профілів ПЗ в поперечному перерізі хвильоводу з необхідним для практичного застосування значенням коефіцієнта локалізації. Тим більше, що задача створення хвильоводів, що мають високі значення коефіцієнта локалізації потужності в заданій смузі частот за рахунок використання складних профілів ПЗ, є актуальною і важливою для практичного використання. Першим кроком запропонованої методик є визначення закону зміни профілю ПЗ в поперечному перерізі хвильоводу.

Згідно [1], з урахуванням лінійної поляризації в нормованому вигляді рівняння, що описує хвильові процеси в хвильоводі, має вигляд

$$\frac{d^2 \Phi(R)}{dR^2} + \left[ u^2 - v^2 \left( g_1(R) + \frac{(l^2 - 1/4)}{v^2 R^2} \right) \right] \Phi(R) = 0 \quad (1)$$

де  $u^2 = a^2(n_1^2 k^2 - \beta^2)$  – нормована стала поширення;  $a$  – радіус серцевини хвильоводу;  $n_1$  – максимальне значення ПЗ в серцевині;  $k = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \omega$  – хвильове число у вільному просторі;  $\omega$  – кутова частота;  $\varepsilon_0$  і  $\mu_0$  – відповідно, діелектрична та магнітна проникність вільного простору;  $\beta$  – поздовжня стала поширення;  $v^2 = u^2 + w^2 = a^2 k^2 n_1^2 2\Delta$  – нормована частота;  $w^2 = a^2(\beta^2 - n_2^2 k^2)$  – параметр, який характеризує поширення хвилі в оболонці;  $n_2$  – значення ПЗ в оболонці;  $\Delta = (n_1^2 - n_2^2)/2n_1^2$ ;  $g_1(R)$  – функція профілю ПЗ;  $l$  – азимутальний індекс моди;  $R$  – безрозмірна радіальна координата;  $\Phi(R)$  – функція, пропорційна поперечним складовим поля.

Граничні умови для функції  $\Phi(R)$  визначаються з умов скінченності поля в нулі і загасання на нескінченності, а також, з умов неперервності дотичних та нормальних складових векторів напруженості  $\mathbf{E}$  та  $\mathbf{H}$  на границі розділу між матеріалами з різними значеннями ПЗ. Після нормування згідно [1], одержимо

$$\Phi(R)|_{R \rightarrow 0} = 0, \Phi(R)|_{R \rightarrow \infty} = const, \Phi(R)|_{R=1+0} = \Phi(R)|_{R=1-0}, \left. \frac{d\Phi(R)}{dR} \right|_{R=1+0} = \left. \frac{d\Phi(R)}{dR} \right|_{R=1-0} \quad (2)$$

У відповідності з [1], використовуємо значення передавальних характеристик певного вихідного хвильоводу з відомим законом зміни ПЗ та розподілом поля фундаментальної моди. Для проектування хвильоводу із заданим значенням коефіцієнта локалізації як вихідний, виберемо хвильовід із ступінчастим профілем ПЗ в поперечному перерізі його серцевини. Вважаємо, що у вихідному хвильоводі на заданій довжині хвилі поширюється дві моди. Рівняння, що описує хвильові процеси в такому хвильоводі, в нормованому вигляді:

$$\frac{d^2 \Phi_1(R)}{dR^2} + \left[ u^2 - v^2 \left( g_0(R) + \frac{(l^2 - 1/4)}{v^2 R^2} \right) \right] \Phi_1(R) = 0, \quad (3)$$

де  $\Phi_1(R)$  – функція, пропорційна поперечним складовим електричного поля;  $g_0(R)$  – функція профілю ПЗ  $g_0(R) = 0$ , при  $R \in (0, 1)$ ,  $g_0(R) = 1$ , при  $R > 1$ .

Граничні умови для функції  $\Phi_1(R)$  аналогічні умовам (2). Згідно методики [2], одержимо, що для визначення закону зміни ПЗ в поперечному перерізі хвилеводу не обхідно розв'язати рівняння

$$K(y, t) = - \int_0^R K(R, y) G(y, t) dy - G(R, t) = 0, \quad (0 < y < R), \text{ з ядром} \quad (4)$$

$$G(R, t) = \int_0^{\infty} \sum_{i=1}^2 F_1(R, u_i) F_1(u_i, t) d\sigma(u), \quad (5)$$

де інтегрування проводиться по зміні диференціалів спектральних функцій рівняння (1)  $\xi(\rho)$  і рівняння (3)  $\xi_1(\rho)$

$$d\sigma(p) = d\xi(p) - d\xi_1(p) = \begin{cases} 0, & 0 < v^2 < p, \\ B\delta(p - p_0) - \sum_{j=1}^2 c_j(p - p_j), & p \in (0, v^2), \\ 0, & p < 0. \end{cases}$$

Спектральний параметр  $p$  пов'язаний із значеннями нормованих сталих поширення  $u$  співвідношенням  $p_N = u_N^2$ ;  $N=1, 2$ ;  $\delta(p - p_j)$  – дельта-функція Дірака;  $c_j$  – нормувальні коефіцієнти, які визначаються формулою [2],

$c_j^{-1} = \int_0^{\infty} \Phi_1^2(R, p_j) dR$ .  $j = 1, 2$ . Коефіцієнт  $B$  необхідно визначити. Для випадку поширюваних мод, сталі поширення яких відповідають дискретній частині спектру рівняння (1), інтегрування виразу (5) дає

$$G(R, p) = B\Phi_1(R, p_0)\Phi_1(t, p_0) - \sum_{j=1}^2 c_j \Phi_1(R, p)\Phi_1(R, p_j), \quad (6)$$

де  $\Phi_1(R, p_i)$  – розв'язок рівняння (3), який відповідає  $i$ -й моді ( $i = 1, 2$ ).

Із виразу (6) випливає, що інтегральне рівняння (4) має вироджене ядро. Отже, його розв'язок можна одержати в аналітичному вигляді

$$K(R, t) = -BA^{(1)}(R)\Phi_1(t, p_0) + \sum_{j=1}^2 c_j A_j^{(1)}(R)\Phi_1(t, p_j) - \\ - B\Phi_1(R, p_0)\Phi_1(t, p_0) + \sum_{j=1}^2 c_j \Phi_1(R, p_j)\Phi_1(t, p_j), \quad 0 < t < R. \quad (7)$$

Функції  $A^{(1)}(R)$ ,  $A_j^{(1)}(R)$ ,  $j = 1, 2$  визначаються із системи рівнянь

$$\begin{aligned} [1 + BT^{(1)}(R)A^*(R)] - c_1 T_1^{(2)}(R)A_1^*(R) - c_2 T_2^{(2)}(R)A_2^*(R) &= F^{(0)}(R), \\ BT_1^{(2)}(R)A^*(R) + A_2^*(R) - c_1 T_{1,1}^{(3)}(R)A_1^*(R) - c_2 T_{1,2}^{(3)}(R)A_2^*(R) &= F^{(1)}(R), \\ BT_2^{(2)}(R)A^*(R) + A_2^*(R) - c_1 T_{2,1}^{(3)}(R)A_1^*(R) - c_2 T_{2,2}^{(3)}(R)A_2^*(R) &= F^{(2)}(R) \end{aligned}$$

коефіцієнти якої мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 T^{(1)}(R) &= \int_0^R \Phi_1^2(t, p_0) dt, & T_1^{(2)}(R) &= \int_0^R \Phi_1(t, p_1) \Phi_1(t, p_0) dt, \\
 T_2^{(2)}(R) &= \int_0^R \Phi_1(t, p_2) \Phi_1(t, p_0) dt, & T_{1,1}^{(3)}(R) &= \int_0^R \Phi_1^2(t, p_1) \Phi_1(t, p_0) dt, \\
 T_{1,2}^{(3)}(R) &= \int_0^R \Phi_1(t, p_1) \Phi_1(t, p_2) dt, & T_{2,1}^{(3)}(R) &= \int_0^R \Phi_1(t, p_2) \Phi_1(t, p_1) dt, \\
 T_{2,2}^{(3)}(R) &= \int_0^R \Phi_1^2(t, p_2) dt, & A^*(R) &= \Phi(R, p), & A_1^*(R) &= \Phi_1(R, p_1), & A_2^*(R) &= \Phi_1(R, p_2)
 \end{aligned}$$

Далі знаходимо, що функції профілю ПЗ в поперечному перерізі хвилеводу визначаються за формулою

$$g_1(R) = g_0(R) + 2 \frac{d}{dR} K(R, R), \quad (8)$$

де  $K(R, R)$  знаходиться з виразу (7). Закон зміни ПЗ в поперечному перерізі хвилеводу визначиться наступним чином

$$n^2(R) = n_1^2 [1 - 2\Delta g_1(R)], \quad \Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}, \quad R < 1 \quad (9)$$

Функція  $\Phi(R)$ , яка пропорційна поперечним складовим електричного поля шуканого хвилеводу, обчислюється згідно оператора перетворення [2].

$$\Phi(R) = \Phi_1(R) \left[ 1 + B \int_0^R \Phi_1^2(t) dt \right]^{-1} \quad (10)$$

Нормувальний параметр  $B$ , який неявно входить у вирази (9), (10) знаходиться з інтегральних співвідношень [3], що пов'язують розподіл поля поширюваної моди з коефіцієнтом локалізації потужності цієї моди.

$\Gamma = \int_{R_1}^{R_2} [F(R, p_0)]^2 R dR / \int_0^\infty [F(R, p_0)]^2 R dR$ , ( $R_1$  і  $R_2$  – границі області локалізації потужності поширюваної моди).

Як приклад запропонованої методики оптимізації профілю ПЗ в поперечному перерізі хвилеводу, побудовані три моделі хвилеводів, у яких на довжині хвилі  $\lambda = 1550$  нм значення коефіцієнту локалізації складало 9,7, за умови заданих значень фазової швидкості  $V_{ph}/c = 0,688$  (крива 1),  $V_{ph}/c = 0,689$  (крива 2),  $V_{ph}/c = 0,690$  (крива 3) рис.1. Методами розв'язку прямої задачі для перевірки правильності одержаних результатів розраховані криві залежності коефіцієнта локалізації потужності поширюваної моди від довжини хвилі у одержаних хвилеводів, які зображені на рис.2. Нумери кривих відповідають номерам профілів ПЗ хвилеводів, представлених на рис.1. Окрім того, у одержаних хвилеводах на заданій довжині хвилі реалізується одномодовий режим, що також є перевагою даного методу.

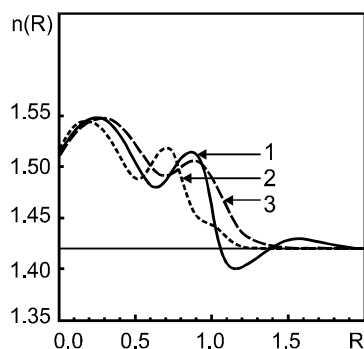


Рис. 1.

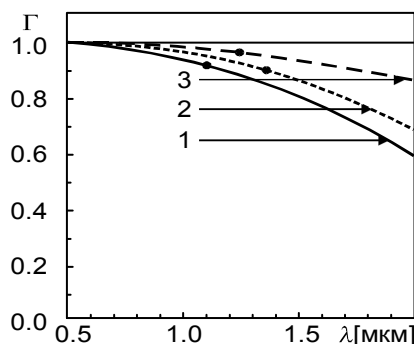


Рис. 2

Запропонована методика дозволяє визначити профіль показника заломлення в поперечному перерізі одномодового хвилеводу із досить високим значенням коефіцієнту локалізації потужності поширюваної моди. Хвилеводи з такими параметрами можуть широко використовувати на практиці при передаванні потужних сигналів.

#### Література

1. Левандовский В.Г. Метод проектирования профиля показателя заломления у хвилеводі круглого поперечного перерізу // Вісник НТУУ "КПІ". Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2009. – Вип. 29. – 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 – 316.
3. Katok V., Levandovskyy V., Shchepkina Y. Singl-mode Lightguide with optimized coefficient of optical power localization // LENM-2004 5-th international Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, Kharkiv, Ukraine, September, с. 185-187, 2004

*Левандовський В.Г. Оптимізація профілю показника заломлення хвилеводу за коефіцієнтом локалізації. Запропонована методика, яка дозволяє визначити профіль показника заломлення в поперечному перерізі одномодового хвилеводу із оптимальним значенням коефіцієнту локалізації потужності поширюваної моди. Хвилеводи з такими параметрами можуть широко використовувати на практиці при передаванні потужних сигналів.*

**Ключові слова:** профіль показника заломлення, хвилевід, коефіцієнт локалізації потужності, електромагнітне поле

*Левандовский В.Г. Оптимизация профиля показателя преломления волновода по коэффициенту локализации. Предложена методика, позволяющая определить профиль показателя преломления в поперечном сечении одномодового волновода с оптимальным значением коэффициента локализации мощности распространяющейся моды. Волноводы с такими параметрами могут широко использоваться на практике при передаче мощных сигналов.*

**Ключевые слова:** профиль показателя преломления, коэффициент локализации мощности, электромагнитное поле

*Levandovskyy V.G. Optimization of refraction index profile of waveguide by localization factor. The technique allowing to define refraction index profile in cross-section of single-mode waveguide with optimum value of power localization factor is offered. Waveguides with such parameters can widely be used in practice for transfer of powerful signals.*

**Keywords:** refraction index profile, power localization factor, electromagnetic field