

Висновки

Технологічні похибки звужують заборонені зони ФК та зменшують подавлення сигналу в цих зонах. Найбільший вплив має похибка періодичності розташування неоднорідностей. Урахування похибок забезпечує відповідність експериментальних та розрахункових характеристик ФК.

Література

1. Бойко В. О., Березянський Б. М., Нелін Є. А. Моделювання тривимірних кристалоподібних структур // Вісн. НТУУ «КПІ». Серія — Радіотехніка. Радіоапаратобудування — 2007. — Вип. 35. — С. 106—110.

Адаменко В.О., Куприна О.Д. Аналіз мікросмушкових фотонних кристалів з урахуванням технологічних похибок. Розглянуто вплив технологічних похибок на характеристики фотонних кристалів. Проведено порівняльний аналіз експериментальних та розрахункових характеристик.

Ключові слова: фотонний кристал, мікросмушкова лінія, технологічні похибки

Адаменко В.А., Куприна Е.Д. Анализ микрополосковых фотонных кристаллов с учетом технологических погрешностей. Рассмотрено влияние технологических погрешностей на характеристики фотонных кристаллов. Проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных характеристик.

Ключевые слова: фотонный кристалл, микрополосковая линия, технологические погрешности

Adamenko V.A., Kuprina E.D. Analysis of microstrip photonic crystals accounting technological inaccuracy. The considered influence of technological inaccuracy on the photonic crystal features. The organized benchmark analysis experimental and accounting features.

Key words: photonics crystal; microstrip-line, technologic mistakes

УДК 621.371

ВИПРОМІНЮВАННЯ ВІДКРИТОГО КІНЦЯ ТОНКОСТІННОГО КРУГЛОГО ХВИЛЕВОДУ НА ОСНОВНІЙ ТА КРОС-ПОЛЯРИЗАЦІЇ

Пільтяй С. І.

Випромінюванням на основній поляризації вважають випромінювання електричного поля в площині, яка паралельна електричному полю джерела. Випромінювання на крос-поляризації – це випромінювання компоненти електричного поля, ортогональної відносно складової поля основної поляризації. При передачі сигналів лише на основній поляризації крос-поляризація не є важливою. При низьких рівнях крос-поляризації можна незалежно передавати сигнали в двох перпендикулярних площинах за допомогою однієї антени. У цьому випадку основна поляризація в одній площині (наприклад, у вертикальній) спричиняє незначну крос-поляризацію в іншій площині (горизонтальній). Тому сигнал однієї основної поляризації (вертикальної) мало впливає на сигнал іншої основної поляризації (горизонтальної). Це дозволяє лише за рахунок використання антен з низькими рівнями крос-поляризації збільшити вдвічі кількість кана-

лів зв'язку в заданій смузі частот. Для теоретичного визначення рівнів крос-поляризації антени необхідно розрахувати її діаграму спрямованості (ДС) в Е та Н площинах.

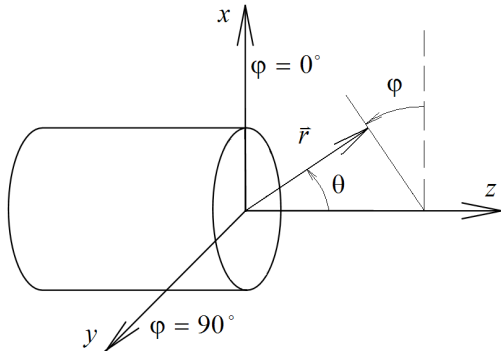


Рис.1. Відкритий кінець круглого хвилеводу

Характеристики випромінювання гофрованих рупорів наближено розраховують методами Фур'є та Кірхгофа-Гюйгенса [1]. Для розрахунку ДС круглої апертури в [2] запропоновано модифікацію методу Фур'є. У [3] наведені точні формули для розрахунку ДС відкритого кінця тонкостінного круглого хвилеводу. Ці формули отримані методом факторизації. Теоретичний і практичний інтерес представляє з'ясування, наскільки відрізняються рівні крос-поляризації випромінювання відкритого кінця тонкостінного круглого хвилеводу, розраховані наближеними методами та точним методом факторизації. Нижче наведені результати розрахунку ДС поля основної поляризації та рівнів крос-поляризації зазначеними методами для відкритого кінця тонкостінного хвилеводу круглого поперечного перерізу (рис.1) при поширенні хвилі H_{11} .

Вираз для ДС відкритого кінця тонкостінного круглого хвилеводу, знайдений методом Фур'є

Вирази для комплексних амплітуд поперечних складових вектора напруженості електричного поля хвиль типу H_{11} у круглому хвилеводі такі:

$$\begin{aligned} \dot{E}_r(r, \varphi, z) &= j \frac{\omega \mu_a}{g_1^2 r} H_0 J_1(g_1 r) \cos(\varphi) \exp(-jh_1 z), \\ \dot{E}_\varphi(r, \varphi, z) &= j \frac{\omega \mu_a}{g_1} H_0 J_1'(g_1 r) \sin(\varphi) \exp(-jh_1 z), \end{aligned}$$

де j – уявна одиниця, $\omega = 2\pi f$ – циклічна частота, μ_a – абсолютна магнітна проникність, $g_1 = 2\pi/\lambda_{\text{кр}H_{11}}$ – поперечне хвильове число, H_0 – амплітудний множник, $J_1(x)$ – функція Бесселя першого роду першого порядку, $J_1'(x)$ – її похідна, $h_1 = \sqrt{(\omega/c)^2 - g_1^2}$ – поздовжнє хвильове число, r, φ, z – координати циліндричної системи. Множники $\exp(-jh_1 z)$ при розрахунку ДС не потрібні.

Вираз для ДС круглої апертури за методом Фур'є:

$$F(\theta, \varphi) = \left| \int_0^{2\pi} \int_0^a \sqrt{[E_r(r, \psi)]^2 + [E_\varphi(r, \psi)]^2} \cdot \exp(ikr \sin(\theta) \cos(\varphi - \psi)) \cdot r dr d\psi \right| \cdot \frac{1 + \cos(\theta)}{2}, \text{ де}$$

a – радіус круглого хвилеводу, k – хвильове число генератора.

Вираз для ДС відкритого кінця тонкостінного круглого хвилеводу, отриманий модифікованим методом Фур'є

У [2] Кларрікоатс пропонує такий вираз для ДС круглої апертури:

$$F(\theta, \varphi) = \left| \int_0^{2\pi} \int_0^a \sqrt{[E_r(r, \psi)]^2 + [E_\phi(r, \psi)]^2} \cdot \exp(ikr \sin(\theta) \cos(\varphi - \psi)) \cdot r dr d\psi \right| \cdot |\cos(\theta)|.$$

Цей вираз придатний для кутів $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$.

Вираз для ДС відкритого кінця тонкостінного круглого хвилеводу, знайдений методом Кірхгофа-Гюйгенса

Результати розв'язання задачі дифракції на кінці хвилеводу круглого поперечного перерізу за принципом Гюйгенса дають такі вирази для ДС круглої апертури [1]:

$$\text{У Е площині: } F(\theta) = \left| \left(1 + \frac{h_{H11}}{k} \cos(\theta) \right) \cdot \frac{J_1(ka \sin(\theta))}{\sin(\theta)} \right|.$$

$$\text{У Н площині: } F(\theta) = \left| J_1'(ka \sin(\theta)) / \left[\frac{h_{H11}}{k} - \cos(\theta) \right] \right|.$$

Вираз для ДС відкритого кінця тонкостінного круглого хвилеводу, знайдений методом факторизації

Розв'язання задачі дифракції на кінці круглого хвилеводу методом факторизації дає такі вирази для ДС відкритого кінця [3]:

У Е площині:

$$F(\theta) = \begin{cases} \frac{J_1(ka \sin(\theta))}{\sin^2(\theta) |H_1(ka \sin(\theta))|} \exp(X(-ka \cos(\theta))), & \text{якщо } \mu_1 \leq ka \leq \nu_1 \\ \frac{J_1(ka \sin(\theta))}{\sin^2(\theta) |H_1(ka \sin(\theta))|} \exp(X(-ka \cos(\theta))) \prod_{i=1}^N \frac{h_i/k - \cos(\theta)}{-h_i/k - \cos(\theta)}, & \text{якщо } \nu_1 \leq ka \end{cases}$$

де μ_n та ν_n – n -й корінь рівняння $J_1'(x) = 0$ та $J_1(x) = 0$ відповідно, $H_1(x)$ – функція Бесселя третього роду I-го порядку, h_i – поздовжні хвильові числа хвиль типу E_{m1} та H_{n1} , для яких справедливо: $\nu_1 \leq ka \leq \nu_m$ (або $\nu_1 \leq ka \leq \mu_n$).

$$X(w) = \frac{-2w \int_0^{ka} \left[\left(\arg(H_1(v)) + \frac{\pi}{2} \right) \cdot v - \left(\arg(H_1(\sqrt{(ka)^2 - w^2})) + \frac{\pi}{2} \right) \cdot \sqrt{(ka)^2 - w^2} \right] dv}{\pi \int_0^{ka} \left[(v^2 - (ka)^2 + w^2) \cdot \sqrt{(ka)^2 - v^2} \right] dv}.$$

У Н площині:

$$F(\theta) = \begin{cases} \frac{J_1'(ka \sin(\theta)) \exp(X(-ka \cos(\theta)))}{\sin^2(\theta) |H_1'(ka \sin(\theta))| \left[\cos^2(\theta) - \left(\frac{h_{H11}}{k} \right)^2 \right]} \cdot A(\theta), & \text{якщо } \mu_1 \leq ka \leq \mu_2 \\ \frac{J_1'(ka \sin(\theta)) \exp(X(-ka \cos(\theta)))}{\sin^2(\theta) |H_1'(ka \sin(\theta))| \left[\cos^2(\theta) - \left(\frac{h_{H11}}{k} \right)^2 \right]} \cdot A(\theta) \cdot \prod_{i=1}^N \frac{h_i/k - \cos(\theta)}{-h_i/k - \cos(\theta)}, & \text{якщо } \mu_2 \leq ka \end{cases}$$

де $H_1'(x)$ – похідна функції Бесселя третього роду першого порядку, h_i – поздовжні хвильові числа хвиль типу E_{m1} та H_{n1} , для яких справедлива нерівність: $\mu_2 \leq ka \leq \nu_m$ (або $\mu_2 \leq ka \leq \mu_n$).

$$A(\theta) = \left| 1 + \cos(\theta) + \frac{2\Delta^2}{1 + \Delta^2} \cdot \frac{\frac{h_{H11}}{k} - \cos(\theta)}{1 - \frac{h_{H11}}{k}} \right|^2$$

$$X(w) = \frac{-2w^{ka}}{\pi} \int_0^{\left[\left(\arg(H_1'(v)) - \frac{\pi}{2} \right) \cdot v - \left(\arg(H_1'(\sqrt{(ka)^2 - w^2})) - \frac{\pi}{2} \right) \cdot \sqrt{(ka)^2 - w^2} \right]} \frac{dv}{(v^2 - (ka)^2 + w^2) \cdot \sqrt{(ka)^2 - v^2}}$$

Параметр Δ можна знайти за графіками з [3].

Вирази для ДС випромінювання на основній та крос-поляризації

Замовника та розробника антени часто цікавить ДС у основних площинах: у Е площині ($\varphi = 0^\circ$), у Н площині ($\varphi = 90^\circ$) та в площині $\varphi = 45^\circ$ (або $\varphi = 135^\circ$), де рівні крос-поляризації максимальні. З фізичної точки зору рівень крос-поляризації показує в скільки разів (або на скільки дБ) поле в площині, перпендикулярній до площини джерела, менше за максимальний рівень головного пелюстка ДС антени.

Математично поле основної поляризації $E_p(\theta, \varphi)$ та поле крос-поляризації $E_q(\theta, \varphi)$ виражають таким чином [2]:

$$\begin{bmatrix} E_p(\theta, \varphi) \\ E_q(\theta, \varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & -\cos(\varphi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_\theta(\theta, \varphi) \\ E_\varphi(\theta, \varphi) \end{bmatrix}, \text{ де } E_\theta(\theta, \varphi), E_\varphi(\theta, \varphi) - \text{кутові}$$

компоненти вектора напруженості електричного поля у сферичній системі координат. У дальній зоні поля випромінювання круглої апертури при поширенні хвилі H_{11} можна записати так: $E_\theta(\theta, \varphi) = C_\theta(\theta)\cos(\varphi)$, $E_\varphi(\theta, \varphi) = C_\varphi(\theta)\sin(\varphi)$, де $C_\theta(\theta)$, $C_\varphi(\theta)$ – ДС у Е та Н площині відповідно. Підставивши ці вирази в попередню матричну рівність, отримаємо:

$$E_p(\theta, \varphi) = C_\theta(\theta)\cos^2(\varphi) + C_\varphi(\theta)\sin^2(\varphi)$$

$$E_q(\theta, \varphi) = \frac{1}{2}[C_\theta(\theta) - C_\varphi(\theta)]\sin(2\varphi).$$

Поле крос-поляризації визначається різницею ДС полів основної поляризації в Е та Н площинах.

Результати чисельного розрахунку ДС випромінювання відкритого кінця тонкостінного круглого хвильоводу на основній та крос-поляризації

Розглянемо діапазон довжин хвиль генератора $\lambda = 0,9 \cdot D \dots 1,5 \cdot D$, де D – діаметр круглого хвильоводу та розрахуємо характеристики ДС випромінювання основної та крос-поляризацій випромінювання відкритого кінця круглого хвильоводу у площині максимальних рівнів крос-поляризації $\varphi = 45^\circ$.

На рис. 2 показана залежність максимуму заднього пелюстка ДС поля основної поляризації від довжини хвилі генератора. Придатними для розрахунку заднього пелюстка ДС є метод Кірхгофа-Гюйгенса та метод факторизації. Як видно на рис. 2, метод Кірхгофа-Гюйгенса та метод факторизації передбачають збільшення максимального рівня заднього пелюстка ДС поля основної поляризації зі збільшенням довжини хвилі генератора. У вказаному діапазоні λ максимальна похибка методу Кірхгофа-Гюйгенса відносно точного методу факторизації становить 46%.

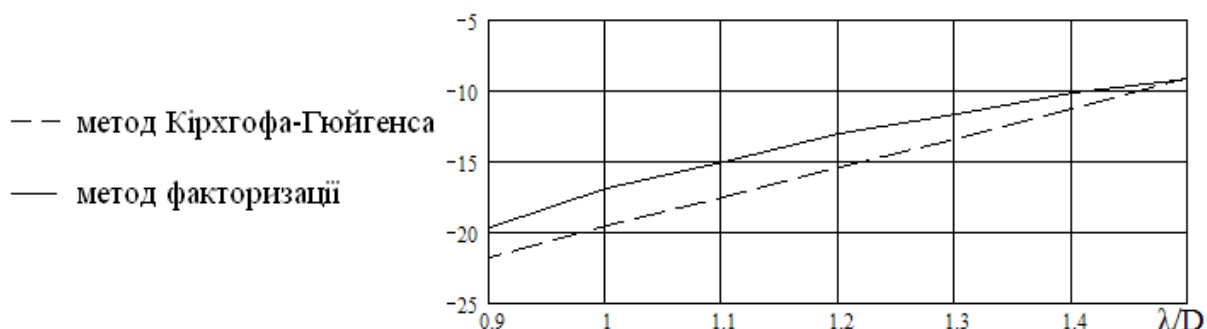


Рис. 2. Максимальний рівень (у дБ) заднього пелюстка ДС поля основної поляризації відкритого кінця тонкостінного круглого хвилеводу

Рис. 3 відображає зміну ширини головного пелюстка ДС випромінювання на основній поляризації зі зміною λ . На рис. 4 показано, як залежить рівень крос-поляризації від довжини хвилі генератора. Рис. 5 демонструє залежність кута максимуму крос-поляризації від λ .

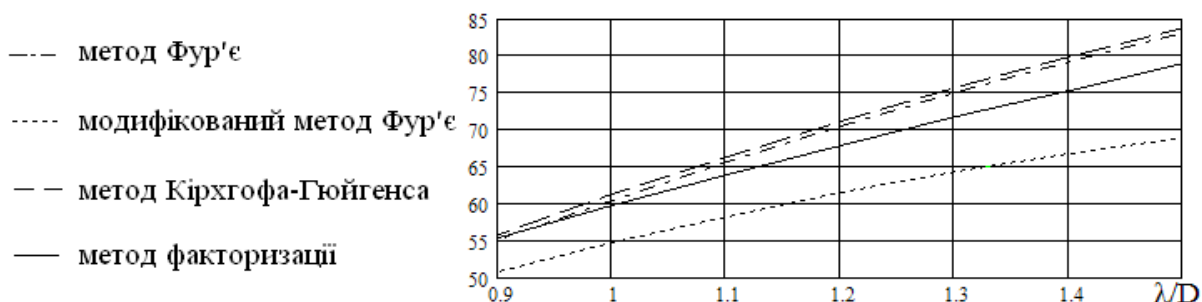


Рис. 3. Ширина (у градусах) головного пелюстка ДС випромінювання основної поляризації відкритого кінця тонкостінного хвилеводу круглого поперечного перерізу

Згідно з методом факторизації ширина головного пелюстка ДС випромінювання поля основної поляризації змінюється в межах від 55° до 79° (див. рис. 3). Максимальна похибка розрахунку ширини головного пелюстка ДС випромінювання поля основної поляризації методом Фур'є становить 5%, методом Кірхгофа-Гюйгенса – 6%, модифікованим методом Фур'є – 12,5%. Указані похибки стосуються діапазону $\lambda = 0,9 \cdot D \dots 1,5 \cdot D$.

Відповідно до рис. 4 метод Кірхгофа-Гюйгенса та метод факторизації передбачають збільшення максимального рівня бічного пелюстка ДС поля

крос-поляризації зі збільшенням довжини хвилі генератора від $1,0 \cdot D$ до $1,5 \cdot D$. У діапазоні довжин хвиль $0,9 \cdot D \dots 1,5 \cdot D$ максимальна похибка методу Фур'є та методу Кірхгофа-Гюйгенса відносно точного методу факторизації перевищує 800%. Похибка модифікованого методу Фур'є становить 450%.

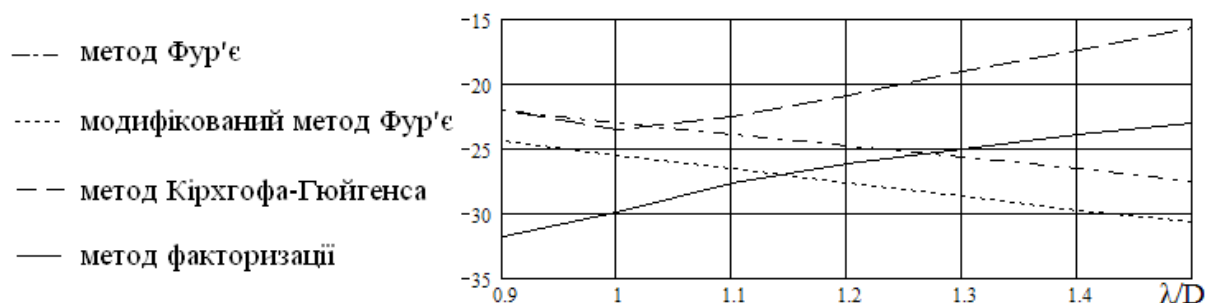


Рис. 4. Максимальний рівень (у дБ) бічного пелюстка ДС поля крос-поляризації у площині $\varphi = 45^\circ$ (рівні крос-поляризації).

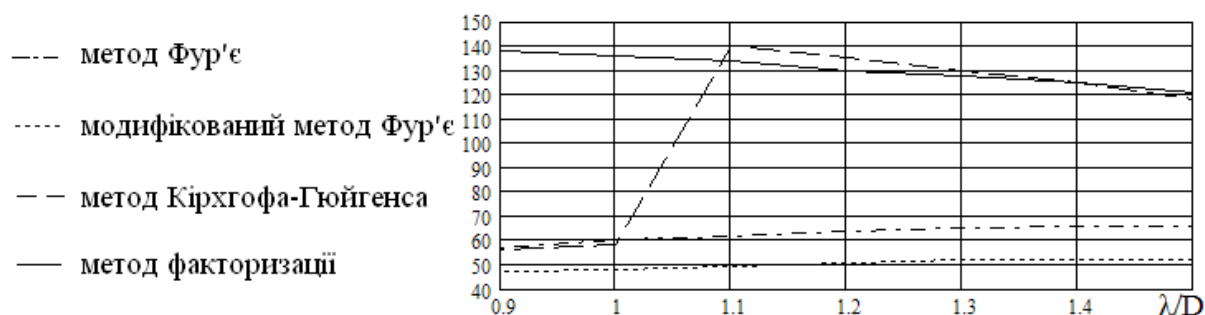


Рис. 5. Кут θ° максимуму бічного пелюстка ДС поля крос-поляризації у площині $\varphi = 45^\circ$

Метод факторизації передбачає зменшення кута θ , який відповідає максимуму бічного пелюстка ДС поля крос-поляризації, від 138° до 121° (див. рис. 5). Максимальна похибка розрахунку вказаного кута θ методом Фур'є становить 58,7%, методом Кірхгофа-Гюйгенса – 59,4%, модифікованим методом Фур'є – 65,9%.

Висновки

Отже, ширину головного пелюстка діаграми спрямованості випромінювання відкритого кінця тонкостінного круглого хвилеводу на основній поляризації близько до точного методу факторизації можна розрахувати методом Фур'є та методом Кірхгофа-Гюйгенса. Метод Кірхгофа-Гюйгенса не придатний для точного розрахунку заднього пелюстка ДС випромінювання відкритого кінця тонкостінного круглого хвилеводу на основній поляризації. Відхилення від точного методу факторизації може перевищувати 40%.

Похибка всіх наближених методів розрахунку рівнів випромінювання відкритого кінця тонкостінного круглого хвилеводу на крос-поляризації значна (понад 400%). У діапазоні довжин хвиль $0,9 \cdot D \dots 1,5 \cdot D$ наближені

методи недоцільно використовувати для розрахунку рівнів випромінювання на крос-поляризації.

Література

1. Л. А. Вайнштейн. Электромагнитные волны. – М.: Изд-во «Советское радио». – 1957. – 581 с.
2. Clarricoats, P.J.V. Corrugated horns for microwave antennas. Peter Peregrinus Ltd., London, UK. – 1984. – 231 p.
3. Л. А. Вайнштейн. Теория дифракции и метод факторизации. – М.: Изд-во «Советское радио». – 1966. – 432 с.

Пільтяй С. І. Випромінювання відкритого кінця тонкостінного круглого хвилеводу на основній та крос-поляризації.

Показано, що ширину головного пелюстка діаграми спрямованості випромінювання на основній поляризації відкритого кінця круглого хвилеводу близько до точного методу факторизації можна розрахувати методами Фур'є та Кірхгофа-Гюйгенса. Наближені методи недоцільно використовувати для розрахунку рівнів випромінювання на крос-поляризації.

Ключові слова: основна поляризація, крос-поляризація, круглий хвилевід.

Пильтяй С. И. Излучение открытого конца тонко-стенного круглого волновода на основной и кроссполяризации. Показано, что ширину главного лепестка диаграммы направленности поля основной поляризации открытого конца круглого волновода близко к точному методу факторизации можно рассчитать методом Фурье и методом Кирхгофа-Гюйгенса. Приближенные методы нецелесообразно использовать для расчета уровней излучения на кроссполяризации.

Ключевые слова: основная поляризация, кроссполяризация, круглый волновод.

Piltyay S. I. Radiation of the thin-walled circular waveguide aperture at co- and crosspolarization. It is shown that width of main lobe of copolar field of a circular waveguide aperture closely to the exact method of factorization can be calculated by Fourier method and Kirchhoff-Huygen method. It is not advisable to use approximate methods for the calculation of radiation levels at crosspolarization.

Keywords: copolarization, crosspolarization, circular waveguide.

УДК 621.372.061

ВЛАСТИВОСТІ СПАРЕНОЇ ГРЕБІНКИ З СИНФАЗНИМ ТИПОМ КОЛИВАНЬ

Найденко В.І., Шумаков Д.С.

Гребінка є канонічною періодичною структурою. Аналізу властивостей власних хвиль у гребінці присвячено значну кількість робіт. Наведемо тут лише найхарактерніші [1 – 5]. Гребінка є електродинамічною системою дифракційної електроніки, наприклад, оротрона [6], генератора дифракційного випромінювання. В міліметровому, субміліметровому і оптичному діапазонах, гребінка застосовується як елементи антенної і вимірювальної техніки, в ядерній фізиці, акустиці. Тим не менше властивості хвиль у гребінці, що розглядається як основний елемент електронних приладів, вивчені в досить грубому наближенні. Характерними тут є публікації [5, 6], в яких наведені результати розрахунку власних хвиль у гребінці в набли-