

7. Valle P.J. Visual axial PSF of diffractive trifocal lenses / P.J. Valle, J.E. Oti, V.F. Canales, and M.P. Cagigal // Optics Express. – 2005. – Vol. 13, No. 7. – Pp. 2782-2792.

8. Ланг Герхард К. Офтальмология. Карманный справочник-атлас : пер. с англ. / Ланг Герхард К.; под ред. В.В. Нероева. – М. : Изд-во "Практическая медицина", 2009. – 837 с.

9. Годжаев Н.М. Оптика : учебн. пособ. [для студ. ВУЗов] / Н.М. Годжаев. – М. : Изд-во "Высш. шк.", 1977. – 432 с.

**Марченко В.А. Мультифокальные интраокулярные линзы и их основные оптические характеристики**

Рассмотрены особенности структуры и конструкции моно- и мультифокальных интраокулярных линз (ИОЛ) различных видов, а также сравнительный анализ их оптических характеристик, обеспечивающих качество зрения пациента.

В результате проведенных исследований определен ряд преимуществ дифракционно-рефракционных мультифокальных ИОЛ по многим параметрам технологичности и качества изображения. Представлены функции рассеяния точки (ФРТ) гибридных ИОЛ с треугольным и бинарным фазовыми профилями при разной глубине рельефа. Приведена формула расчета внешних радиусов зон Френеля для диаметра зрачка до 3 мм. Показано, что амплитуда каждого из двух дифракционных максимумов ИОЛ с треугольным профилем больше амплитуды каждого из трех максимумов линз с бинарным профилем приблизительно на 30 %, однако адаптационные возможности сетчатки глаза человека могут компенсировать такую разницу относительной интенсивности дифракционных максимумов.

Дальнейшие исследования характеристик ИОЛ являются актуальной научной задачей и направлены на определение оптических параметров, которые обеспечивают оптимальное распределение световой энергии между фокусами линзы, с помощью компьютерного моделирования модуляционной передаточной функции (МПФ) дифракционно-рефракционных ИОЛ с разными фазовыми профилями.

**Ключевые слова:** катаракта, пресбиопия, интраокулярная линза (ИОЛ), дифракционный рельеф, фазовый профиль, функция рассеяния точки интраокулярной линзы.

**Marchenko V.O. Multifocal Intraocular Lenses and Their Main Optical Characteristics**

The aim of this article is a structured and design analysis of mono- and multifocal intraocular lenses (IOL) of different types and comparative research of their optical characteristics, which provide retinal image quality after implantation. Scientific analysis has shown a number of advantages of the diffractive/refractive multifocal IOLs, according to the different technological and image quality parameters. Point spread functions (PSF) of such type of IOLs with triangular and binary phase profiles with different profile depths were shown. Besides this, the mathematical equation for outer radiuses of Fresnel zones estimation was given for a pupil of a diameter less than 3 mm. Finally it is submitted that the amplitude of each of the two diffractive maximums of lenses with triangular profile is 30 % bigger than the amplitude of each of three diffractive maximums of binary profile. However, the adaptation abilities of human eye retina can compensate such a difference between relative intensity of the diffractive maximums. Further IOL' characteristics research has a significant scientific aim and may be carried out toward the determination of the optical parameters, which provide optimal light energy distribution at the focal plane of the eye. This can be done by means of computer simulations of the modulation transfer function (MTF) of diffractive/refractive IOL with different phase profile forms.

**Keywords:** cataract, presbyopia, intraocular lens (IOL), diffractive profile form, phase profile, point spread function of intraocular lens.

УДК 004.942:537.86/87

Доц. В.В. Гоблик, канд. фіз.-мат. наук;

асист. І.В. Ничай, канд. техн. наук – НУ "Львівська політехніка"

**ПРО ВПЛИВ КРАТНОСТІ ПЕРІОДУ НА ДІАГРАМУ НАПРЯМЛЕНОСТІ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ СТРУКТУРИ**

Розглянуто вплив кратності періоду модуляції діелектричної проникності плоскої структури на просторовий розподіл електромагнітного поля. Запропоновано математичну модель та наведено результати розрахунку. Виявлені особливості формування поля випромінювання пластиною для випадку модуляції діелектричної проникності двома кратними періодичними послідовностями прямокутних функцій, накладених одна на одну. Показано, що двократна модуляція діелектричної проникності пластини сприяє появі нових ефектів випромінювання поля, пов'язаних з формою профілю та періодом слідування неоднорідностей.

**Ключові слова:** періодична діелектрична структура, подвійна періодичність, електромагнітне поле, математична модель.

Періодичні структури (ПС) є предметом детальної уваги дослідників різних галузей знань [1, 2]. Їх використовують для побудови антен, радіоінтерферометрів, оптичних фільтрів тощо [3]. Проте потенційні можливості ПС для створення інфокомунікаційних пристроїв вивчені ще не повною мірою. Зокрема, не розглянуто питання дослідження впливу кратності періоду модуляції структури на просторовий розподіл поля. Оскільки період структури є одним із важливих параметрів, зміна якого може істотно вплинути на електродинамічні властивості структури, задача, поставлена у цій роботі, є актуальною.

**Основні математичні співвідношення.** Структура, властивості якої досліджено у цій роботі, представляє собою плоску періодично-неоднорідну діелектричну пластину.

У загальному випадку, розподіл діелектричної проникності структури задамо таким виразом [2]:

$$\epsilon'(y) = \epsilon'_{a0} + \sum_{i=1}^N \epsilon'_{aM_i} \sum_{n_i=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{y - n_i d_i}{\Delta}\right), \quad (1)$$

де:  $d_i$  – період просторової модуляції структури;  $N$  – число накладених одна на одну кратних періодичних послідовностей прямокутних функцій;  $\Delta$  – ширина неоднорідності;  $\epsilon'_{a0}, \epsilon'_{aM_i}$  – комплексна діелектрична проникність пластини та її неоднорідностей [3].

Нехай діелектрична пластинка в системі координат  $(x, y, z)$  збуджується нитковидним джерелом струму:

$$I_x^M(y, z) = I_{x0}^M \delta(y-0) \delta(z-0). \quad (2)$$

Спектральна густина джерела поля визначається таким чином [3]:

$$F(\chi) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left[ \frac{\chi^2}{i\omega\epsilon'_a} j_z^e - i\chi \left( \frac{\pm\sqrt{\chi^2 - k^2}}{i\omega\epsilon'_a} j_y^e + j_x^M \right) \right] \times e^{i\chi y \mp \sqrt{\chi^2 - k^2} z'} dy' dz', \quad (3)$$

де  $S$  – площа перетину області, яку займає джерело струму, площиною  $X=\text{const}$ .

У роботі [4] побудовано математичну модель (ММ) у вигляді інтегрального рівняння (ІР) Фредгольма другого роду модульованої діелектричної струк-

тури. Така модель отримана внаслідок суворого рішення одновимірної електродинамічної задачі збудження джерелом електромагнітного поля  $F(\chi)$  плоскої модульованої структури та у роботі [4] записана у вигляді такого співвідношення:

$$\varepsilon(y) = \frac{1}{\omega^2 \mu_0 b} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\chi^2 - k^2} f(\chi) e^{-i\chi y} d\chi}{\int_{-\infty}^{\infty} [F(\chi) + f(\chi)] e^{-i\chi y} d\chi}. \quad (4)$$

Співвідношення (4) пов'язує між собою спектральну густину первинного та вторинного поля зі законом зміни діелектричної проникності  $\varepsilon(y)$ . Функція  $f(\chi)$  описує діаграму напрямленості вторинного поля, а функція  $F(\chi)$  – діаграму напрямленості первинного поля.

В цій роботі запропоновано ММ нескінченної плоскої діелектричної структури у вигляді гіллястих ланцюгових дробів (ГЛД) [5, 6]. Такі дробі є асимптотичним рішенням у спектральному вигляді згаданого ІР Фредгольма другого роду для випадків, коли закон модуляції діелектричної проникності є результатом накладання кратних одна одній періодичних послідовностей прямокутних функцій [7, 8].

Рішення задачі у вигляді ГЛД відрізняється тим, що воно отримане в замкнутому вигляді і тому дає змогу дослідити ряд фундаментальних закономірностей формування спектру просторових гармонік поля плоских діелектричних структур [9-12]. Результати цієї роботи можуть бути використані також для створення елементів інфокомунікаційних систем на базі модульованих нанорозмірних структур. Для випадку  $N=2$  просторовий розподіл поля, яке поширюється над такою структурою, описується такою математичною моделлю [10]:

$$F_2(\tilde{\chi}) = -2i \frac{(\sqrt{\tilde{\chi}^2 - 1})}{D_{0,\Delta}(\tilde{\chi}) D_{1,\Delta}(\tilde{\chi}) D_{2,\Delta}(\tilde{\chi})} \quad (3)$$

де:

$$D_{0,\Delta}(\tilde{\chi}) = \sqrt{\tilde{\chi}^2 - 1} - Z_0, \quad D_{1,\Delta}(\tilde{\chi}) = 1 + Z_1 \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \frac{\text{sinc}(n_1\pi\Delta/d_1)}{D_{0,\Delta}(\tilde{\chi} - n_1T_1)},$$

$$D_{0,\Delta}(\tilde{\chi} - n_1T_1) = \sqrt{(\tilde{\chi} - n_1T_1)^2 - 1} - Z_0, \quad D_{0,\Delta}(\tilde{\chi} - n_2T_2) = \sqrt{(\tilde{\chi} - n_2T_2)^2 - 1} - Z_0,$$

$$D_{2,\Delta}(\tilde{\chi}) = 1 + Z_2 \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} \frac{\text{sinc}(n_2\pi\Delta/d_2)}{D_{0,\Delta}(\tilde{\chi} - n_2T_2) D_{1,\Delta}(\tilde{\chi} - n_2T_2)},$$

$$D_{1,\Delta}(\tilde{\chi} - n_2T_2) = 1 + Z_1 \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \frac{\text{sinc}(n_1\pi\Delta/d_1)}{\sqrt{(\tilde{\chi} - n_1T_1 - n_2T_2)^2 - 1} - Z_0}, \quad \text{sinc}(n_1\pi\Delta/d_1) = \frac{\sin(n_1\pi\Delta/d_1)}{n_1\pi\Delta/d_1},$$

$$\text{sinc}(n_2\pi\Delta/d_2) = \frac{\sin(n_2\pi\Delta/d_2)}{n_2\pi\Delta/d_2}, \quad Z_0 = \hat{b}\varepsilon_{a0}, \quad Z_1 = -\frac{\tilde{\varepsilon}'_{aM1}\hat{b}\Delta}{d_1}, \quad Z_2 = -\frac{\tilde{\varepsilon}'_{aM2}\hat{b}\Delta}{d_2}, \quad \tilde{\varepsilon}'_{a0} = \frac{\varepsilon'_{a0}}{\varepsilon_0},$$

$$\tilde{\varepsilon}'_{aM1} = \frac{\varepsilon'_{aM1}}{\varepsilon_0}, \quad \tilde{\varepsilon}'_{aM2} = \frac{\varepsilon'_{aM2}}{\varepsilon_0}, \quad \hat{b} = \frac{b}{\lambda}, \quad T_1 = \frac{\lambda}{d_1}, \quad T_2 = \frac{\lambda}{d_2}, \quad \tilde{\chi} = \frac{\chi}{k}.$$

Змінна  $\chi$  – просторова частота:  $\chi = 2\pi / \lambda$ ,  $[-\infty \leq \chi \leq \infty]$ ;  $\lambda$  – довжина хвилі,  $k$  – хвильове число для вакууму. Функція  $F(\tilde{\chi})$  (3) описує спектральну густину

сумарного поля, яке є результатом накладання поля джерела та поля наведених в середовищі періодичної неоднорідної діелектричної структури поляризаційних струмів.

Для переходу від спектральної густини сумарного поля  $F(\chi)$  (3.4) до функції  $F(\theta)$ , яка описує просторовий розподіл поля і представляє собою залежність напруженості електричної складової поля від просторового кута  $\theta$ , необхідно провести заміну змінних у (3): змінну  $\chi$  замінимо на  $k \sin \theta$  [3].

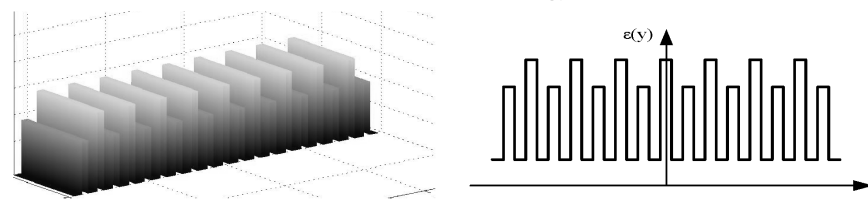


Рис. 1. Закон модуляції діелектричної проникності структури для періоду  $d_2=2d_1$

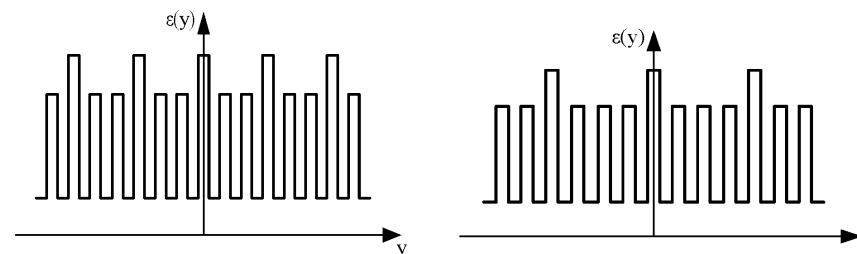


Рис. 2. Закон модуляції діелектричної проникності структури для періоду  $d_2=3d_1$

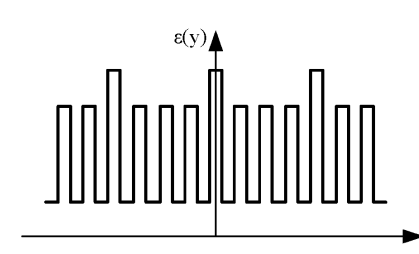


Рис. 3. Закон модуляції діелектричної проникності структури для періоду  $d_2=4d_1$

У випадку модуляції діелектричної проникності двома періодичними послідовностями прямокутних функцій приклади розподілу діелектричної проникності показано на рис. 1-3, а (1) набуде такого вигляду:

$$\varepsilon'(y) = \varepsilon'_{a0} + \varepsilon'_{aM1} \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{y - n_1d_1}{\Delta}\right) + \varepsilon'_{aM2} \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{y - n_2d_2}{\Delta}\right). \quad (4)$$

Графічне пояснення побудови таких профілів зміни діелектричної проникності  $\varepsilon'(y)$  (рис. 1-3) вздовж осі  $y$  для випадку коли  $\varepsilon'_{a0} = 2\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon'_{aM1} = \varepsilon_0$ ,  $\varepsilon'_{aM2} = -1.5\varepsilon_0$  представлено на рис. 4. На рис. 4 (а) відображено постійну складову  $\varepsilon'_{a0}$ ; на рис. 4 (б) – періодичну послідовність прямокутних імпульсів, завширшки  $\Delta$  ( $\Delta \ll \lambda$ ) та висотою  $\varepsilon_0$ , з періодом слідування  $d_1 = 0.5\lambda$ ; на рис. 4 (в) – періодичну послідовність прямокутних імпульсів завширшки  $\Delta$  та висотою  $-1.5\varepsilon_0$  з періодом слідування  $d_2 = \lambda$ .

Таким чином, на рис. 4 (г) отримуємо, внаслідок додавання трьох складових, періодичну діелектричну пластину, в структурі якої присутні неоднорідності завширшки  $\Delta$ , діелектрична проникність яких  $(\varepsilon'_{a0} + \varepsilon'_{aM1})$  – при періоді модуляції діелектричної пластини  $d_1$ , та  $(\varepsilon'_{a0} + \varepsilon'_{aM1} + \varepsilon'_{aM2})$  – при періоді  $d_2$  ( $d_2 = 2d_1$ ).

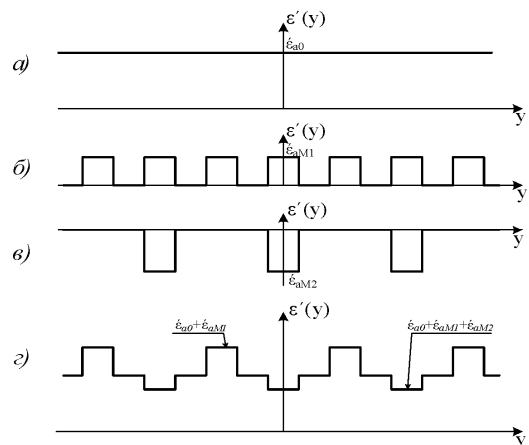


Рис. 4. Результуючий профіль зміни діелектричної проникності  $\epsilon'(y)$  вздовж осі у діелектричній структурі

**Результати моделювання.** На рис. 5-8 відображено результати розрахунку діаграм напрямленості поля, тобто просторового розподілу поля періодичної діелектричної структури, для різних законів модуляції її діелектричної проникності кратними періодичними послідовностями прямокутних функцій.

Діаграму напрямленості на рис. 5 отримано для випадку, коли діелектрична проникність структури модульована однією кратною періодичною послідовністю прямокутних функцій, тобто  $\epsilon'_{aM2} = 0$ . Математична модель для періодичної діелектричної пластини з подвійною періодичністю (3) дає змогу дослідити зміни у просторовому розподілі поля для випадків  $d_2 = pd_1$ , де  $p \in N$ .

На рис. 6 та 7 показано вплив наявності модуляції діелектричної проникності структури двома кратними періодичними послідовностями прямокутних функцій (суцільна лінія) з періодом  $d_2 = 2d_1$  на вигляд діаграми напрямленості. Для порівняння, на рис. 6 та 7 також наведено просторовий розподіл поля структури з однократною періодичністю (штрих-пунктирною лінією).

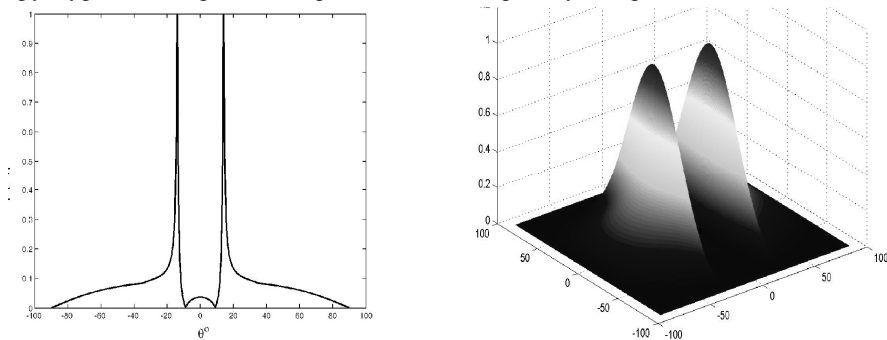


Рис. 5. Просторовий розподіл поля періодичної діелектричної пластини для випадку  $\epsilon'_{aM2} = 0$

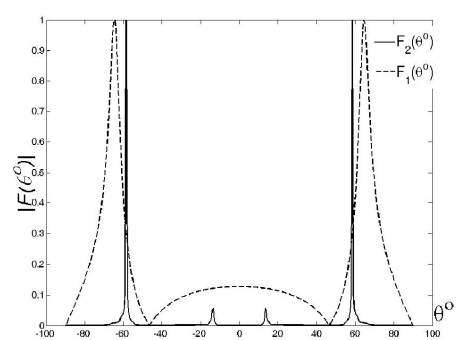


Рис. 6. Просторовий розподіл поля періодичної діелектричної пластини для параметрів  $d_2 = 2d_1$ , при  $d_1 = 0.461\lambda$ .

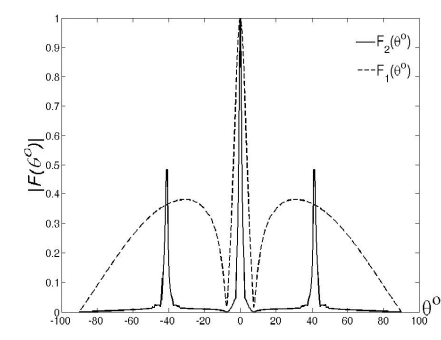


Рис. 7. Просторовий розподіл поля періодичної діелектричної структури для параметрів  $d_2 = 2d_1$ ,  $d_1 = 0.763\lambda$ .

На рис. 8 наведено результати моделювання впливу на просторовий розподіл поля величини кратності періоду структури, яка характеризується подвійною модуляцією її діелектричної проникності.

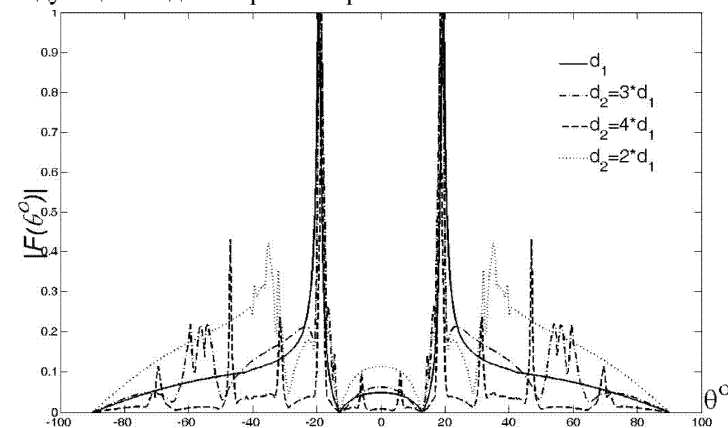


Рис. 8. Вплив величини періоду  $d_2$  на просторовий розподіл поля діелектричної структури з двократною періодичністю

Розрахунок просторового розподілу електромагнітного поля у області "дійсних кутів"  $\theta'$  здійснено з використанням розробленої комп'ютерної моделі, в основу якої покладено модель (3), в якій здійснено таку заміну:  $\chi' = \sin \theta'$ .  $\chi' = \chi/k$ . Кут  $\theta'$  відраховується від нормалі до періодичної пластини.

**Висновки.** Розроблено комп'ютерну модель на основі суворого рішення відповідної електродинамічної задачі, досліджені в середовищі MATLAB просторові розподіли поля модульованої діелектричної пластини. Виявлено особливості формування поля випромінювання пластинною для випадку модуляції діелектричної проникності двома кратними, накладеними одна на одну послідовностями імпульсних функцій прямокутної форми. Встановлено, що введення додаткової модуляції діелектричної пластини значно розширює кількість нових

ефектів випромінювання поля, пов'язаних з формою профілю та періодом слідування неоднорідностей. Зокрема, збільшення величини періоду  $d_2$ , приводить до зменшення ширини головних пелюсток та рівня бокового випромінювання, що має важливе практичне значення для створення елементів інфокомунікаційних систем на базі таких структур.

Запропонована математична модель є ефективною для випадків, коли біжуча хвиля стороннього джерела, якою збуджуються неоднорідності, не добігає до кінця структури. Енергія такої хвилі перетворюється в об'ємні хвилі, які випромінюються у вільний простір. Такі випадки характерні для структур поверхневих хвиль, наприклад не виступаючих антен поверхневих хвиль, плазмон-поляритонних структур, фотонних кристалів, інтерферометрів оптичного діапазону хвиль, що містять велике число ( $n_1 > 50$ ,  $\Delta < 0.1\lambda$ ) періодично-розташованих неоднорідностей. Таке рішення задачі, отримане у замкненому вигляді, цінне не тільки тим, що є ефективним знаряддям для дослідження фундаментальних властивостей модульованих діелектричних структур зі складним профілем зміни комплексних діелектричних проникностей. Воно прозоро зв'язує між собою конструктивні параметри антен, просторових фільтрів, комутаторів, коліматорів, інтерферометрів з параметрами спектра просторових гармонік поля, що дає змогу створити високоефективні комп'ютерні інструменти для синтезу конструкції широкого кола елементів інфокомунікаційних систем на основі нанорозмірних структур.

Фізико-математичні моделі випромінюючих та хвилеводних структур з  $N$ -кратною періодичністю, що створюються в цьому напрямі досліджень на основі суворих рішень електродинамічних задач, можуть бути використані як еталони для оцінки адекватності результатів, отриманих експериментальним шляхом, або наближеними числовими методами.

### Література

1. Brillouin L.M. Propagation in Periodic Structures, Electric Filters and Crystal Lattices / L.M. Brillouin // International series in Pure and Applied Physics. – New York and London, 1946. – 247 p.
2. Гоблик В.В. Моделювання фотонних кристалів гіллястими ланцюговими дробами / В.В. Гоблик, В.А. Павлич, І.В. Ничай // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Сер.: "Радіоелектроніка та телекомунікації". – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2007. – № 595. – С. 78-86.
3. Марков Г.Т. Возбуждение электромагнитных волн / Г.Т. Марков, А.Ф. Чаплин. – М. : Изд-во "Энергия", 1967. – 191 с.
4. Чаплин А.Ф. Синтез плоской диэлектрической антенны / А.Ф. Чаплин // Труды Московского энергетического ин-та. – 1975. – Вып. 237. – С. 52-58.
5. Боднар Д.И. Ветвящиеся цепные дроби / Д.И. Боднар. – К. : Вид-во "Наук. думка", 1986. – 176 с.
6. Скоробогатко В.Я. Теория ветвящихся цепных дробей и ее применение в вычислительной математике / В.Я. Скоробогатко. – М. : Изд-во "Наука", 1983. – 312 с.
7. Гоблик В.В. Анализ поля над импедансной плоскостью с периодическими дискретными неоднородностями методом А.Ф. Чаплина / В.В. Гоблик // Теоретические и экспериментальные методы исследования антенн и устройств СВЧ : сб. науч. тр. – Львов : Изд-во Львов. политехн. ин-та, 1984. – С. 27-70. – Деп. В УкрНИИИИТИ, № 1874 Ук-84.
8. Гоблик В.В. Дис. канд. фіз.-мат. наук. – Харків, 1986. – 210 с.
9. Hoblyk V.V. About solution of the Fredholm integrated equation in a branched continual fraction type / V.V. Hoblyk, N.N. Goblyk // International School-Seminar "Continued Fraction, their Generalization and Application", Uzhhorod National University, 2002. – Pp. 16-18.

10. Ничай І.В. Дис. канд. техн. наук. – Львів, 2013. – 138 с.
11. Hoblyk V.V. Calculation of the field of periodically nonuniform dielectric plate by the method of A.F. Chaplin / V.V. Hoblyk, V.A. Pavlysh, I.V. Nychai // Materials of 8th International Conference on Antenna Theory and Techniques. – Kyiv, 2011. – Pp. 278-280.
12. Гоблик В.В. Інфокомунікаційні властивості періодично-неоднорідної діелектричної пластини / В.В. Гоблик, І.В. Ничай // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Сер.: "Електроніка". – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2008. – № 619. – С. 29-36.

### Гоблик В.В., Ничай І.В. О влиянии кратности периода на диаграмму направленности диэлектрической структуры

Рассмотрено влияние кратности периода модуляции диэлектрической проницаемости плоской структуры на пространственное распределение электромагнитного поля. Предложена математическая модель и приведены результаты моделирования. Выявлены особенности формирования поля излучения пластиной для случая модуляции диэлектрической проницаемости двумя кратными периодическими последовательностями прямоугольных функций, накладываемых друг на друга. Показано, что двукратная модуляция диэлектрической проницаемости пластины способствует появлению новых эффектов излучения поля, связанных с формой профиля и периодом следования неоднородностей.

**Ключевые слова:** периодическая диэлектрическая структура, двойная периодичность, электромагнитное поле, математическая модель.

### Hoblyk V.V., Nychai I.V. On the Influence of the Multiplicity Period on the Diagram of the Dielectric Structure Directivity

The influence of multiplicities of modulation period of the structure, excited threadlike source, on the spatial field distribution is tested. The mathematical model and simulation results are represented. Some features of formation of the radiated field of the plate in the case of modulation of the dielectric permittivity by two periodic sequences of rectangular functions imposed on each other are considered. It is shown that the double modulation of the dielectric permittivity of the plate contributes to the emergence of new effects of radiations field associated with the shape of the profile and with the period of the following of nonuniformities.

**Keywords:** periodic dielectric structure, double periodicity, electromagnetic field, mathematical model.

УДК 004.934.2:657.6

Доц. О.В. Бондаренко, канд. екон. наук –  
НЛТУ України, м. Львів

### АНАЛІЗ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ АУДИТУ

Досліджено актуальні питання щодо аналізу програмного забезпечення аудиту, його теоретичні та практичні аспекти. Виконано дослідження програмного забезпечення як методу проведення аудиту. Висвітлено структуру світового ринку аудиторського програмного забезпечення. Проаналізовано особливості створення комп'ютерних програм та їх вплив на роботу аудиторів загалом. Розкрито сучасний стан програмного забезпечення та перспективи його вдосконалення. Визначено особливості роботи програмного забезпечення для проведення аудиту та обґрунтовано напрями його вдосконалення. Визначені сучасні тенденції та пріоритети розвитку аудиторської професії з допомогою комп'ютерного аудиту.

**Ключові слова:** аудит, аналіз, програмне забезпечення, інформаційні технології, комп'ютерні системи бухгалтерського обліку (КСБО).