

**МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ  
ОБРОБКИ СИГНАЛІВ**

DOI: 10.20535/1970.67(1).2024.306721

УДК 681.7.067.22

**АВТОМАТИЗОВАНИЙ СИНТЕЗ СВІТЛОСИЛЬНИХ ОБ'ЄКТИВІВ ДЛЯ  
СУЧАСНИХ ПРИЛАДІВ НІЧНОГО БАЧЕННЯ**<sup>1)</sup>Сокурєнко В. М., <sup>2)</sup>Сокурєнко О. М.<sup>1)</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

<sup>2)</sup>ВСП «Оптико-механічний фаховий коледж Київського національного університету імені  
Тараса Шевченка», Київ, УкраїнаE-mail: [sokurenko2@meta.ua](mailto:sokurenko2@meta.ua)

Статтю присвячено дослідженню можливостей автоматизованого розроблення світлосильних та високоякісних багатолінзових об'єктивів, призначених для застосування в приладах нічного бачення з сучасними електронно-оптичними перетворювачами покоління 4 і 4+, які мають діаметр фотокатода до 18 мм. Такі перетворювачі характеризуються розширеною спектральною чутливістю, високим відношенням сигнал/шум та підвищеною роздільною здатністю. Для розрахунку конструктивних параметрів світлосильних об'єктивів була використана комп'ютерна програма *PODIL*, призначена для автоматизованого проектування довільних оптичних систем. Для параметричного синтезу оптичних систем об'єктивів в даній роботі застосувався реалізований в програмі модифікований еволюційний алгоритм. В статті представлено загальну методику та результати автоматизованого параметричного синтезу серії оптичних систем лінзових об'єктивів з різними фокусними відстанями, які містять від 7 до 9 лінз зі сферичними поверхнями. Синтезовані об'єктиви забезпечують значення кутового поля зору 10°, 37° і 60° без вільетування осьових та позаосьових пучків променів. Діафрагмові числа дорівнюють 1,5, 1,33 і 1,4, відповідно. Робочий спектральний діапазон розрахованих об'єктивів визначається спектральною чутливістю фотокатодів електронно-оптичних перетворювачів та в даній роботі охоплює довжини хвиль від 0,45 до 0,9 мкм. Повздовжній розмір розрахованих оптичних систем (тобто відстань від першої оптичної поверхні до площини фотокатода) становить від 80 до 106 мм. Представлені результати абераційного аналізу свідчать про високу якість зображення отриманих оптичних систем. Так, максимальні просторові частоти розрахованих поліхроматичних дифракційних модуляційних передавальних функцій всіх об'єктивів в меридіональній та сагітальній площинах по всьому полю перевищують 50 мм<sup>-1</sup>. Максимальні значення відносної дисторсії отриманих об'єктивів знаходяться в межах від 1 % до 2 %.

**Ключові слова:** об'єктив; електронно-оптичний перетворювач; 4G+; прилад нічного бачення; параметричний синтез; дисторсія; аберація.

**Вступ**

Сучасні електронно-оптичні перетворювачі покоління 4 і 4+ здатні забезпечити високу якість зображення в приладах нічного бачення. Вони мають розширену спектральну чутливість, високу роздільну здатність, яка досягає 76 ліній/мм. Показник добротності (FOM або Figure Of Merit) таких перетворювачів може перевищувати 2800 [1-3].

Для належної роботи зазначених електронно-оптичних перетворювачів та максимального використання їх можливостей потрібно застосовувати світлосильні та високоякісні оптичні компоненти, здатні функціонувати в широкому спектральному діапазоні. Так, робочий діапазон сучасної апаратури нічного бачення має охоплювати довжини хвиль, щонайменше, від 0,45 до 0,9 мкм. Фотокатод в сучасних електронно-оптичних перетворю-

вачах розмішений на внутрішній стороні плоско-паралельної пластини значної товщини (від 5 до 6 мм), яка також вносить свій хроматизм. Крім того, важливою вимогою до оптичної системи об'єктива, що формує дійсне зображення в площині фотокатода електронно-оптичного перетворювача, є мале значення діафрагмового числа (зазвичай не більше 1,5). Ця вимога зумовлена необхідністю отримання високого рівня опроміненості фотокатода. Без застосування асферичних поверхонь задовольнити перелічені технічні вимоги можна лише за допомогою нестандартних багатолінзових систем.

На жаль, задача розроблення високоякісних світлосильних об'єктивів зі значним кутовим полем зору, добре скоригованих на монохроматичні та хроматичні аберації в широкому спектральному

діапазоні, залишається складною та потребує від розробника одночасного врахування багатьох вимог функціонального характеру і конструкторських обмежень [4, 5].

Традиційні методи проектування оптичних систем, за яких вибір початкової схеми та процес оптимізації є незалежними один від одного, потребують значної кількості зусиль, просунутих навичок проектування та глибокого досвіду конструктора [4, 6]. Вчені, дослідники та інженери-оптики вже давно сподівалися на автоматизоване проектування оптичних систем [7]. Як буде показано нижче, досягти бажаного результату можна за допомогою алгоритмів розрахунку, що базуються на потужних алгоритмах глобальної оптимізації.

У цьому дослідженні представлено процедуру та результати автоматизованого параметричного синтезу багатолінзових світлосильних об'єктивів для використання разом з сучасними комерційними зразками електронно-оптичних перетворювачів останнього покоління.

#### Постановка задачі досліджень

Основною метою даної роботи є перевірка можливостей автоматизованого розрахунку світлосильних багатолінзових об'єктивів, призначених для роботи в широкому спектральному діапазоні з сучасними електронно-оптичними перетворювачами останнього покоління. На відміну від більш складних оптичних систем, що містять асферичні поверхні, об'єктиви зі сферичними поверхнями є більш технологічними та дешевшими, що важливо для масового виробництва приладів нічного бачення.

Нижче засобами автоматизованого проектування буде здійснено параметричний синтез серії світлосильних оптичних систем зі сферичними поверхнями з різними функціональними параметрами. Важливо, що такий синтез буде проведений без застосування будь-яких попередніх габаритних і аберційних розрахунків та без використання стартових систем з високою якістю зображення.

Основні функціональні параметри багатолінзових об'єктивів, що підлягали в даній роботі автоматизованому синтезу, наведені в табл. 1. Розглянуті в даній роботі оптичні системи розраховувалися для лінійного розміру зображення (фотокаатода електронно-оптичного перетворювача) 17,5 мм та вхідних скляних пластин товщиною біля 5,55 мм. Приклади поширених електронно-оптичних перетворювачів показані на рис. 1.

Основні функціональні параметри багатолінзових об'єктивів, що підлягали в даній роботі автоматизованому синтезу, наведені в табл. 1. Розглянуті в даній роботі оптичні системи розраховувалися для лінійного розміру зображення (фотокаатода електронно-оптичного перетворювача) 17,5 мм та вхідних скляних пластин товщиною біля 5,55 мм. Приклади поширених електронно-оптичних перетворювачів показані на рис. 1.

Таблиця 1. Функціональні параметри отриманих світлосильних об'єктивів для приладів нічного бачення

№ п/п	Кутове поле зору в просторі предметів, °	Загальна кількість лінз	Задня фокусна відстань, мм	Діаметр вхідної зіниці, мм	Відносний отвір	Спектральний діапазон, нм	Діаметр фотокаатода електронно-оптичного перетворювача, мм
1	10	7	100	66,7	1:1,5	500...900	17,5
2	37	9	26,4	19,8	1:1,33	450...900	17,5
3	60	9	15,5	11,2	1:1,4	450...900	17,5



Рис. 1. Сучасні комерційні електронно-оптичні перетворювачі компанії Photonis: *a* – модель XR5 [1]; *б* – модель 4G+ [2]

#### Методика параметричного синтезу об'єктивів для приладів нічного бачення

Для розрахунку конструктивних параметрів світлосильних об'єктивів з різною фокусною відстанню була використана комп'ютерна програма PODIL [8]. Вона призначена для автоматизованого проектування оптичних систем різноманітного призначення. Закладені підпрограми дозволяють

провести аналіз, синтез та оптимізацію довільних оптичних систем, що містять заломлюючі, відбиваючі або дифракційні поверхні сферичного та асферичного типу [9-11].

Для параметричного синтезу оптичних систем світлосильних об'єктивів в даній роботі застосувався модифікований еволюційний алгоритм багатовимірної математичної оптимізації, реалізо-

ваний у вищезазначеному програмному забезпеченні. Алгоритм відноситься до класу стохастичних та використовує окремі ідеї генетичних алгоритмів. Як прямий метод оптимізації, він не вимагає обчислення похідних, а потребує лише можливості розрахунку значення цільової (оціночної) функції [12-15]. Основними перевагами реалізованого алгоритму є вбудовані механізми адаптації до заданої користувачем оціночної функції, результативність та висока швидкодія.

Спрощена блок-схема використаного для розрахунку алгоритму представлена на рис. 2. Алгоритм ітераційно діє доти, доки не буде досягнутий критерій припинення (наприклад, виконана певна кількість ітерацій, вичерпаний певний час або досягнута прийнятне значення оціночної функції). Під час моделювання як параметри оптимізації (тобто оптимізаційні змінні) були вибрані радіуси кривизни оптичних поверхонь, осьові відстані між лінзами та повітряні проміжки.

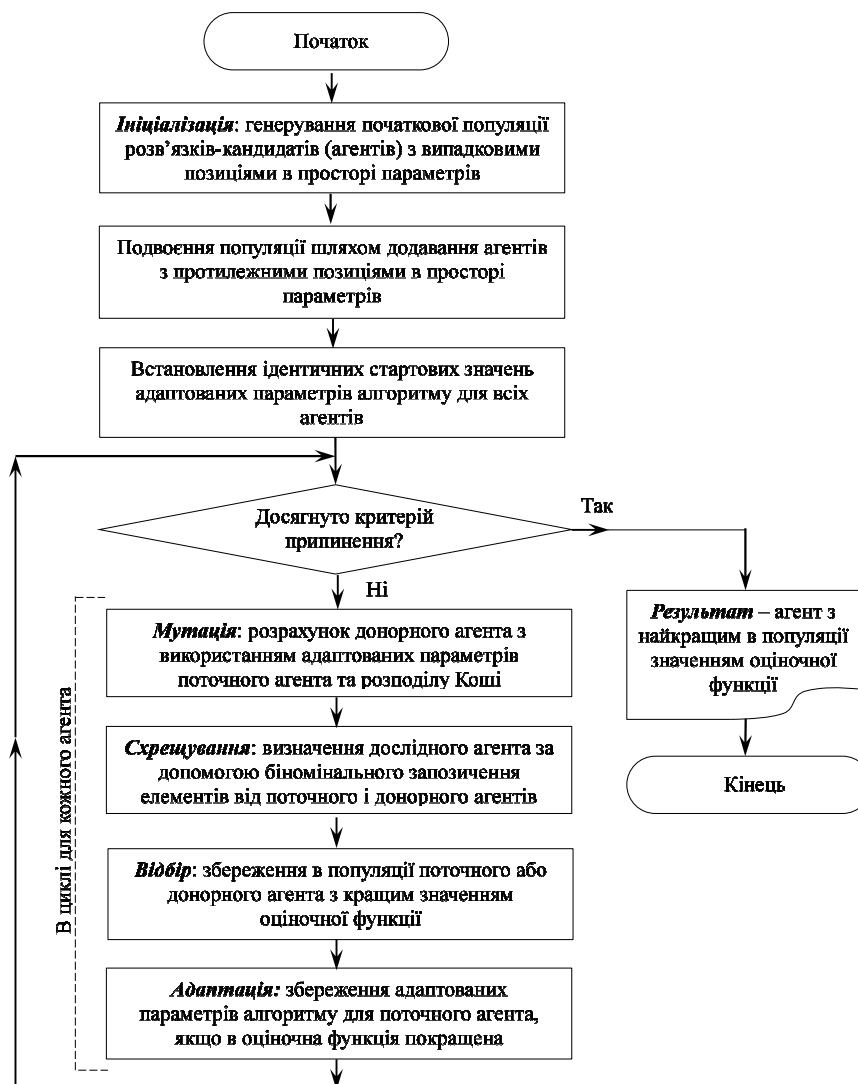


Рис. 2. Спрощена блок-схема модифікованого адаптованого алгоритму диференціальної еволюції Коші, використана для параметричного синтезу оптичних систем

Крім того, оптимальні для конкретної оптичної системи марки скла знаходилися програмою автоматично з вибраного каталогу скла (в даному дослідженні, каталогу CDGM). Критерій оптимальності визначався складовими елементами заданої оціночної функції, які мали свій ваговий коефіцієнт та бажане значення. Загальна кількість пошукових змінних в розглянутих оптичних системах досягала 56. Площина зображень суміщала-

ся з площиною фотокатода електронно-оптичного перетворювача, за якою розміщується безпосередньо мікроканальна пластинка.

Для досягнення високої якості зображення на першому етапі розрахунку формувалася оціночна функція, що мінімізує середньоквадратичні радіуси світлових плям для осьового пучка для декількох предметних точок разом з осьовою та периферійною. Максимальне допустиме значення відносної дистор-

сії встановлювалося на рівні 2 %. Кут нахилу головного променя периферійного пучка перед фотокатодом обмежувався величиною  $10^\circ$ .

На другому етапі розрахунку оціночна функція зводилася вже до максимізації значень дифракційних модуляційних передавальних функцій об'єктива на середніх просторових частотах для всіх заданих точок поля зору. Загальна кількість таких предметних точок в даному дослідженні встановлювалася рівною 4 та 5.

### Результати параметричного синтезу об'єктивів для приладів нічного бачення

Оптичні схеми з ходом променів трьох синтезованих світлосильних об'єктивів з різною фокусною відстанню для приладів нічного бачення представлено на рис. 3.

Табл. 2 містить габаритні розміри об'єктивів та параметри їх якості зображення.

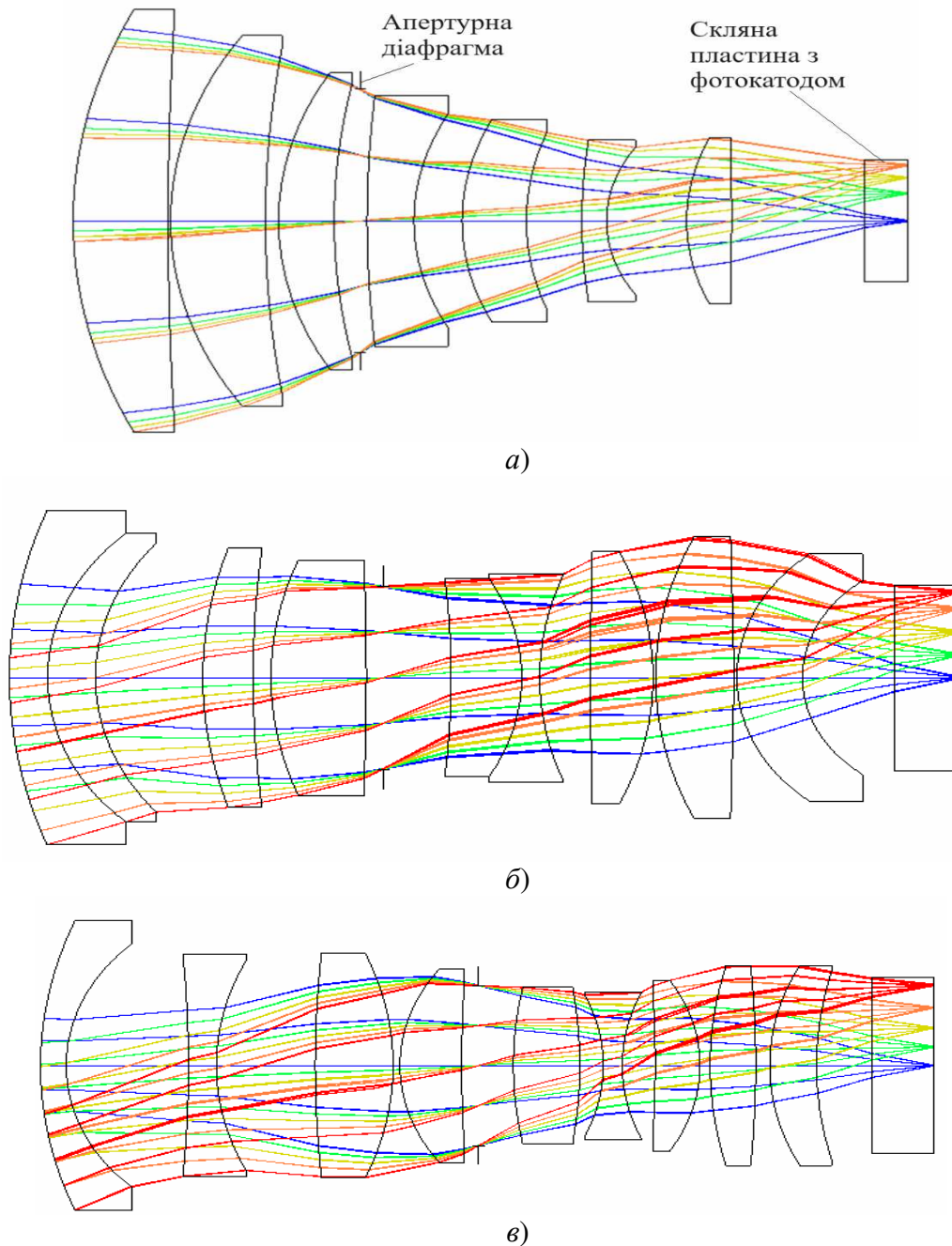


Рис. 3. Оптичні схеми з ходом променів синтезованих об'єктивів, де: *a* – з кутовим полем зору  $10^\circ$ ; *b* – з кутовим полем зору  $37^\circ$ ; *c* – з кутовим полем зору  $60^\circ$

Таблиця 2. Параметри якості зображення синтезованих оптичних систем об'єктів для приладів нічного бачення

№ п/п	Задня фокусна відстань, мм	Максимальний світловий діаметр об'єктива, мм	Повздовжній розмір об'єктива*, мм	Відносна дисторсія, %	Діапазон значень поліхроматичних дифракційних модуляційних передавальних функцій об'єктива в меридіональному та сагітальному перетинах по всьому полю зображень	
					для просторової частоти $30 \text{ мм}^{-1}$	для просторової частоти $40 \text{ мм}^{-1}$
1	100	67,3	106	1,1	0,44...0,62	0,39...0,53
2	26,4	29,2	79,6	1,8	0,48...0,64	0,29...0,55
3	15,5	32	80,3	2	0,27...0,57	0,14...0,41

\* Під повздовжнім розміром розуміється відстань від першої поверхні об'єктива до площини зображень.

На рис. 4 і 5 зображені графіки функцій концентрації енергії та графіки поліхроматичних дифракційних модуляційних передавальних функцій синтезованих систем для різних точок поля зору. Використані під час розрахунку спектральні діапазони роботи об'єктів зазначені в табл. 1. Результати абераційного аналізу показу-

ють, що отримані в цій роботі оптичні системи забезпечують високу якість зображення. З рис. 5 видно, що максимальні просторові частоти трьох синтезованих об'єктів помітно перевищують  $50 \text{ ліній/мм}$  як в меридіональній, так і в сагітальній площинах. У всіх розглянутих об'єктивах значення відносної дисторсії знаходиться в межах від 1 % до 2 %.

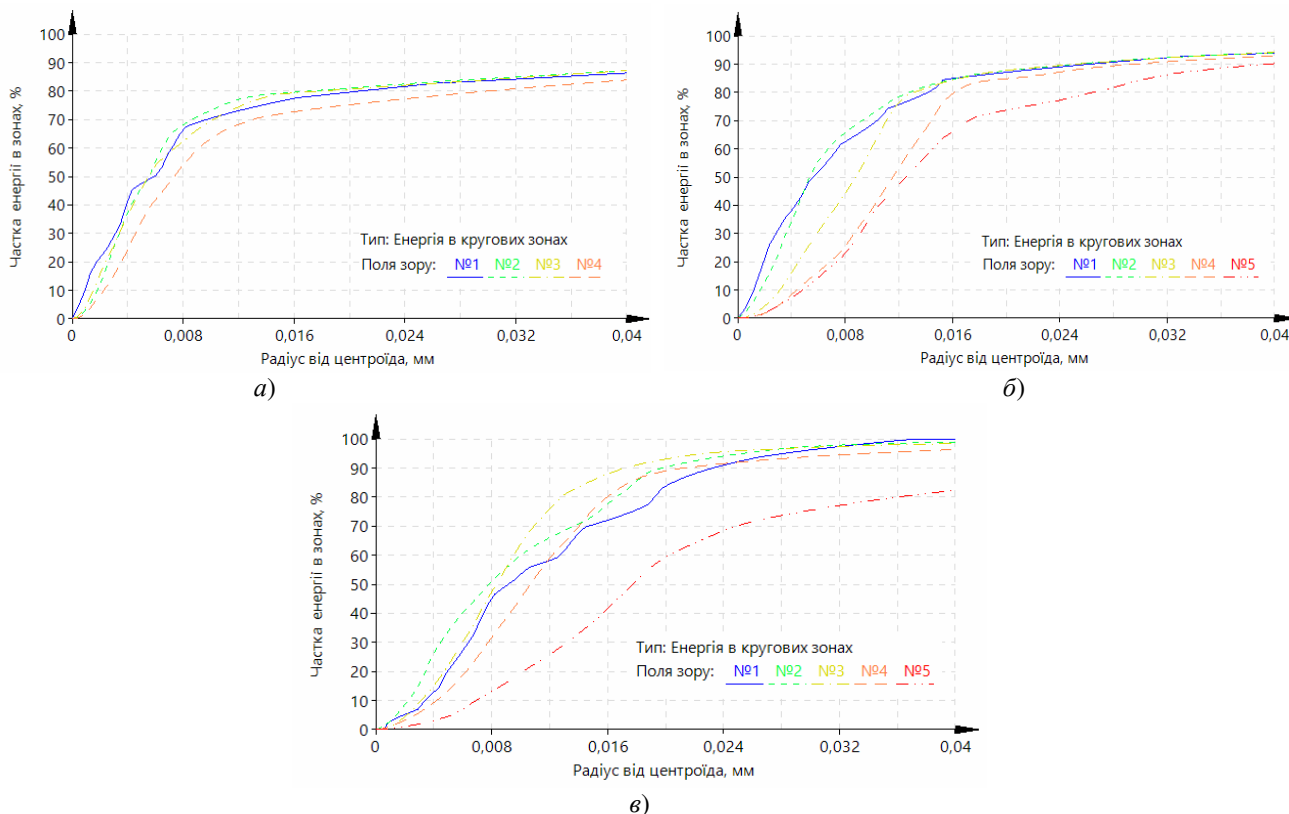


Рис. 4. Геометричні функції концентрації енергії в кругових зонах синтезованих об'єктів, де: *a* – з кутовим полем зору  $10^\circ$  (поля зору №1-4 відповідають предметним точкам з кутовими координатами  $0^\circ$ ,  $2,5^\circ$ ,  $3,5^\circ$  і  $5^\circ$ ); *b* – з кутовим полем зору  $37^\circ$  (поля зору №1-5 відповідають предметним точкам з кутовими координатами  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  і  $18,5^\circ$ ); *v* – з кутовим полем зору  $60^\circ$  (поля зору №1-5 відповідають предметним точкам з кутовими координатами  $0^\circ$ ,  $7,5^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $22,5^\circ$  і  $30^\circ$ )

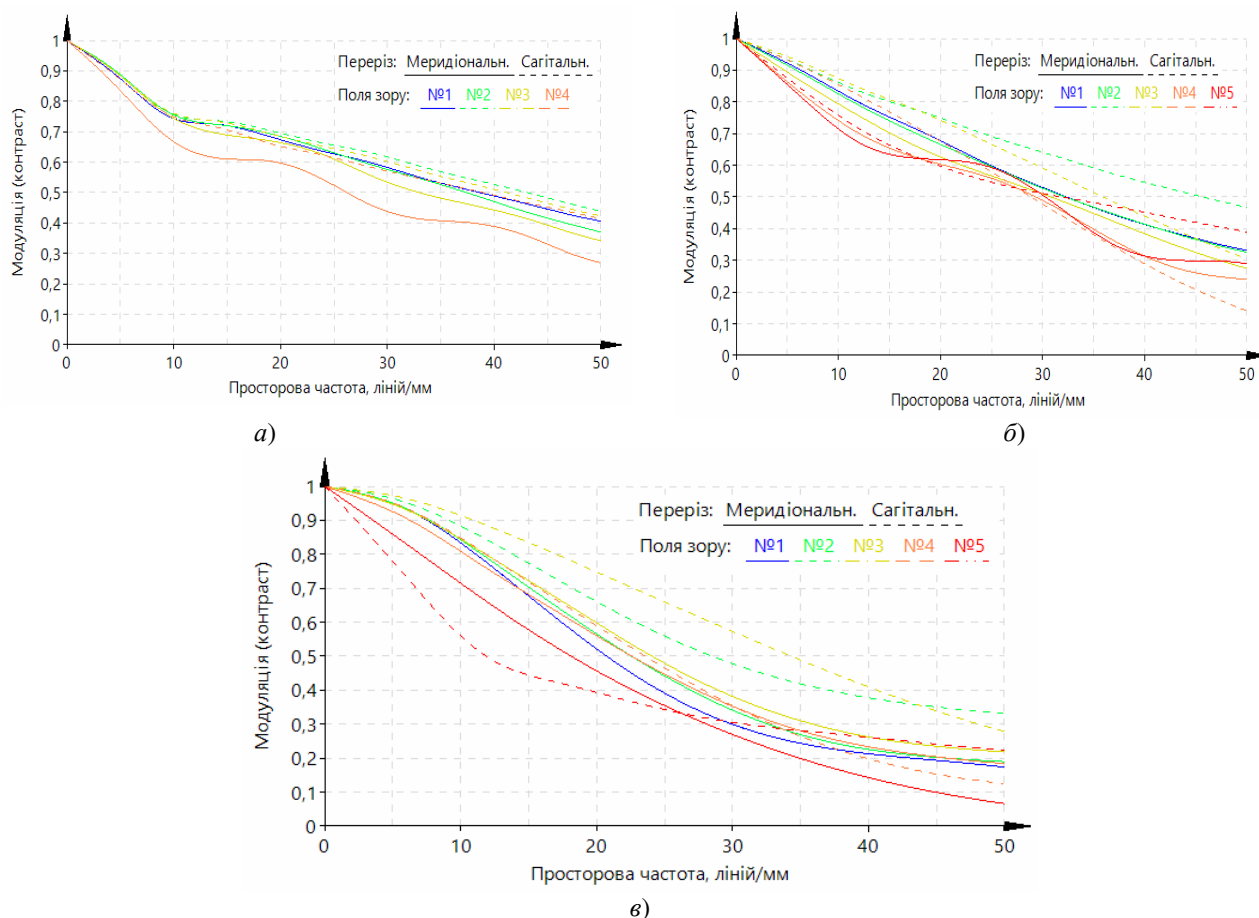


Рис. 5. Поліхроматичні дифракційні модуляційні передавальні функції синтезованих об'єктивів, де: *a* – з кутовим полем зору  $10^\circ$  (поля зору №1-4 відповідають предметним точкам з кутовими координатами  $0^\circ$ ,  $2,5^\circ$ ,  $3,5^\circ$  і  $5^\circ$ ); *б* – з кутовим полем зору  $37^\circ$  (поля зору №1-5 відповідають предметним точкам з кутовими координатами  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  і  $18,5^\circ$ ); *в* – з кутовим полем зору  $60^\circ$  (поля зору №1-5 відповідають предметним точкам з кутовими координатами  $0^\circ$ ,  $7,5^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $22,5^\circ$  і  $30^\circ$ )

Таким чином, розроблені світлосильні багатолінзові об'єктиви можуть бути застосовані в приладах нічного бачення з сучасними електронно-оптичними перетворювачами покоління 4 і 4+.

### Висновки

В цій роботі здійснено автоматизований параметричний синтез серії оптичних систем світлосильних об'єктивів для сучасних приладів нічного бачення. Розроблені варіанти оптичних систем мають фокусні відстані 15,5 мм, 26,4 мм і 100 мм та діафрагмові числа 1,5, 1,33 і 1,4, відповідно. Синтезовані оптичні системи об'єктивів забезпечують огляд кутового поля зору  $10^\circ$ ,  $37^\circ$  і  $60^\circ$  без виньєтування променів та містять від 7 до 9 лінз зі сферичними поверхнями. Осьова довжина об'єктивів становить від 80 до 106 мм. Представлені об'єктиви призначені для використання в сучасних приладах нічного бачення з комерційними електронно-оптичними перетворювачами покоління 4 і 4+, які мають діаметр фотокатоду до 18 мм. Наведені результати абераційних розрахунків свідчать про досягнуте коригування монохроматичних та хроматичних аберацій в широкому спектральному діапазоні, яких

охоплює довжини хвиль від 0,45 мкм до 0,9 мкм. Максимальні просторові частоти поліхроматичних дифракційних модуляційних передавальних функцій в меридіональній та сагітальній площинах по всьому полю зору перевищують 50 ліній/мм. У всіх розглянутих об'єктивах значення відносної дисторсії знаходиться не перевищує 2 %.

Наступні дослідження доцільно направити на пошук та розроблення компактних асферичних оптичних систем з більшим кутовим полем зору та відмінною якістю зображення.

### Література

- [1] XR5 Image Intensifier Tube. Photonis Technologies S.A.S. 2024. Режим доступу: [https://www.penlink.se/fileadmin/user\\_upload/Penlink/Products/Electro-Optics/Image\\_Intensifiers/Image-Intensifier-Tube-XR5.pdf](https://www.penlink.se/fileadmin/user_upload/Penlink/Products/Electro-Optics/Image_Intensifiers/Image-Intensifier-Tube-XR5.pdf).
- [2] 4G+ Image Intensifier Tubes. Photonis. Exosens Group. 2024. Режим доступу: [https://www.exosens.com/system/files/2023-12/Photonis\\_4G%2B%20Image%20Intensifier%20Tube\\_Leaflet\\_15112023.pdf](https://www.exosens.com/system/files/2023-12/Photonis_4G%2B%20Image%20Intensifier%20Tube_Leaflet_15112023.pdf).

- [3] В. М. Сокурєнко, *Фотоприймальні елементи та пристрої* [Електронний ресурс]: навч. посібн. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023.
- [4] B. Walker, *Design for Visual Systems*. SPIE Press. 2000. 159 p. DOI: 10.1117/3.391324.
- [5] *Handbook of Optical Systems. Volume 4: Survey of Optical Instruments*. Edited by Herbert Gross. 2008. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 1092 p.
- [6] R. Fischer, B. Tadic-Galeb, P. Yoder, *Optical System Design*, 2nd Edition. New York: McGraw-Hill Education; 2008. 809 p.
- [7] Tong Yang, Guo-Fan Jin and Jun Zhu, “Automated design of freeform imaging systems”, *Light: Science & Applications*, 6, e17081, 2017. DOI: 10.1038/lsa.2017.81.
- [8] V. Sokurenko, “Automated Design of Multi-element Optical Systems for Various Purposes,” In: *Bezuglyi, M., Bouraou, N., Mykytenko, V., Tymchuk, G., Zaporozhets, A. (eds) Advanced System Development Technologies I. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 511. Springer, pp. 85–115, 2024. Cham. DOI:10.1007/978-3-031-44347-3\_3.
- [9] В. М. Сокурєнко, І. О. Смажко, “Автоматизований розрахунок оптичної системи SWIR-об’єктива”, *Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки*. №6 (279). с. 202-205, 2019. DOI: 10.31891/2307-5732-2019-279-6-202-205.
- [10] V. Sokurenko, O. Sokurenko, “Automated design of zoom riflescope with extended parameters”, *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 102–109, 2022. DOI: 10.20535/kpissn.2022.1-2.252085.
- [11] В. Сокурєнко і О. Сокурєнко, “Автоматизований розрахунок ортоскопічних асферичних дзеркальних об’єктивів Корша для наносупутників”, *Bull. Kyiv Polytech. Inst. Ser. Instrum. Mak.*, is. 66(2), pp. 15–20, Dec. 2023. DOI: 10.20535/1970.66(2).2023.294934.
- [12] R. Storn, K. Price, “Differential evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces”, *J. Glob. Optim.*, 11, 341–359, 1997. DOI: 10.1023/A:1008202821328.
- [13] S. Das, P. Suganthan, “Differential evolution: A survey of the state-of-the-art”, *IEEE Trans. Evol. Comput.*, 15, 4–31, 2011. DOI: 10.1109/TEVC.2010.2059031.
- [14] M. Georgioudakis, V. Plevris, “A comparative study of Differential Evolution variants in vonstrained structural optimization”, *Frontiers in Built Environment*, vol. 6, July 2020, Article 102. DOI: 10.3389/fbuil.2020.00102.
- [15] P. Bujok, M. Lacko, P. Kolenovsk, “Differential Evolution and Engineering Problems”, *Soft Computing Journal*, vol. 29, no.1, June 2023, Brno, Czech Republic. pp. 45–54. DOI:10.13164/mendel.2023.1.045.

UDC 681.7.067.22

## AUTOMATED SYNTHESIS OF FAST LENSES FOR MODERN NIGHT VISION DEVICES

<sup>1)</sup>V. M. Sokurenko, <sup>2)</sup>O. M. Sokurenko<sup>1)</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine<sup>2)</sup>Optical and mechanical professional college of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

This article is devoted to research of the possibilities of automated design of fast and high-quality multi-lens objectives intended for use in night vision devices with modern image intensifier tubes of generation 4 and 4+, which have photocathodes with a diameter of up to 18 mm. Such image intensifier tubes are characterized by extended spectral sensitivity, high signal-to-noise ratio, and increased resolution. The computer program PODIL, developed earlier for the automated design of arbitrary optical systems, was applied to find out prescription data of fast lenses. For the parametric synthesis of optical systems, the modified evolutionary algorithm implemented in the program was used.

The article presents the general methodology and results of automated parametric synthesis of a series of optical systems of objectives with different focal lengths, which contain from 7 to 9 lenses with spherical surfaces. The synthesized lenses provide angular field of view of 10°, 37° and 60° without any vignetting of axial and peripheral beams. The correspondent F numbers are 1.5, 1.33, and 1.4. The working spectral range of the designed lenses is determined by the spectral sensitivity of the photocathodes of the image intensifier tubes. In this research, it covers wavelengths from 0.45 to 0.9 μm. The longitudinal size of the designed optical systems (i.e. the distance from the first optical surface to the photocathode’s plane) is found within the range from 80 to 106 mm. The presented results of aberration analysis confirm the high image quality of the obtained optical systems. In particular, the maximum spatial frequencies of the evaluated polychromatic diffraction modulation transfer functions of the lenses over the entire field in both meridional and sagittal planes exceed 50 mm<sup>-1</sup>. The maximum values of relative distortion of the lenses are obtained within the range from 1% to 2%.

**Keywords:** mirror system; Korsch telescope; nanosatellite; CubeSat; remote sensing of Earth; distortion; aberrations.

Надійшла до редакції  
17 квітня 2024 року

Рецензовано  
25 травня 2024 року



© 2024 Copyright for this paper by its authors.  
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).