

СОКУРЕНКО Вячеслав

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0001-5057-182X>e-mail: sokurenko2@meta.ua

ХУТОРОВИЙ Іван

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
e-mail: akryzhnii@ukr.net

СОКУРЕНКО Олег

ВСП «Оптико-механічний фаховий коледж
Київського національного університету імені Тараса Шевченка»
e-mail: opticsom@gmail.com

РОЗРОБЛЕННЯ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ 16-ЛІНЗОВИХ ОРТОСКОПІЧНИХ ТЕЛЕОБ'ЄКТИВІВ

В даній роботі виконано багаторазову перевірку результативності процедури автоматизованого синтезу нових оптичних систем телеоб'єктивів, яка базується на алгоритмі стохастичної глобальної оптимізації. Зокрема, здійснено абераційний синтез декількох оптичних систем 16-лінзових ортоскопічних телеоб'єктивів з фокусною відстанню 300 мм, відносним отвором 1:2,8, які призначені для роботи в видимому спектральному діапазоні з матричними приймачами зображення повнокадрового формату 35-мм. Наведені результати розрахунку зазначених телеоб'єктивів підтверджують результативність запропонованого підходу та практичну можливість досягнення високої якості виправлення аберацій в розглянутих оптичних системах навіть без використання флюориту (фториду кальцію).

Ключові слова: телеоб'єктив, повнокадровий формат 35-мм, флюорит, ортоскопічний, глобальна оптимізація, аберація, якість зображення.

SOKURENKO Vyacheslav, KHUTOROVYI Ivan

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

SOKURENKO Oleg

Optical-mechanical faculty college of Taras Shevchenko National University of Kyiv

DEVELOPMENT OF OPTICAL SYSTEMS OF 16-LENS ORTHOSCOPIC TELEPHOTO LENSES

In this work, the possibilities of creating multi-lens optical systems of telephoto lenses with a fixed focal length and high image quality with the help of a computer have been experimentally investigated. The effectiveness of the automated procedure for creating new optical systems of orthoscopic telephoto lenses was repeatedly examined. The design procedure utilizes a modified version of the modern stochastic global optimization algorithm. In particular, we carried out the aberration synthesis of several optical systems of 16-lens orthoscopic telephoto lenses having the effective focal length of 300 mm and a F-number equal to 2.8, and designed to work in the visible spectral range with 35-mm full-frame image matrix detectors. Multiple computer simulations of the design process have shown that the global optimization procedure with a total number of variables of around 90 requires significant computing power. Specifically, when running on the Intel Core i9-9900K processor in multi-threaded mode and optimizing the values of the modulation transfer functions, the design procedure can exceed 50 hours. The maximum value of the relative distortion of synthesized variants of telephoto lenses does not exceed 0.017%. In all considered cases, the values of polychromatic modulation transfer functions for a spatial frequency of 30 lines/mm are not smaller than 0.5 over the entire image field. The design results obtained for the specified telephoto lenses confirm the effectiveness of the proposed approach and the practical possibility of achieving high-quality correction of aberrations in the above-mentioned multi-lens telephoto systems even without the use of fluorite (calcium fluoride).

Keywords: telephoto lens, full-frame 35-mm format, fluorite, orthoscopic, global optimization, aberration, image quality.

Вступ

На сьогодні лінзові та дзеркально-лінзові телеоб'єктиви знайшли широке застосування в різних галузях техніки (насамперед в фото- і відеоапаратурі, геодезії та військовій техніці) завдяки властивостям наближення зображення віддалених об'єктів.

Якщо найпростіші варіанти лінзових телеоб'єктивів з коефіцієнтом телескорочення близько 0,8 можуть містити лише два дублети-ахромати (позитивний і негативний), розділені значним повітряним проміжком [1, 2], то більш складні зразки телеоб'єктивів потребують біля 8 лінз. Проте навіть така кількість лінз зі сферичними поверхнями не здатна забезпечити якісну корекцію монохроматичних і хроматичних аберацій при великому кутовому полі зору. При застосуванні повнокадрових матричних фотоприймачів з розмірами діагоналі чутливої площадки 44 мм і більше оптичні системи телеоб'єктивів навіть з середньою світлосилою потребують щонайменше 12 лінз. При цьому конструктору-розробнику доводиться окремі лінзи проектувати із коштовних марок скла та кристалів, що мають особливі дисперсійні властивості [3–5], або ж застосовувати в оптичній системі складні асферичні поверхні високих порядків, виробництво та контроль яких вимагає суттєвих затрат.

На рис. 1 представлені сучасні комерційні зразки телеоб'єктивів від провідних світових компаній. Значна кількість оптичних поверхонь в них дозволяє на практиці досягти якісного виправлення

монохроматичних та хроматичних аберацій та забезпечити високі значення контрасту на різних просторових частотах.

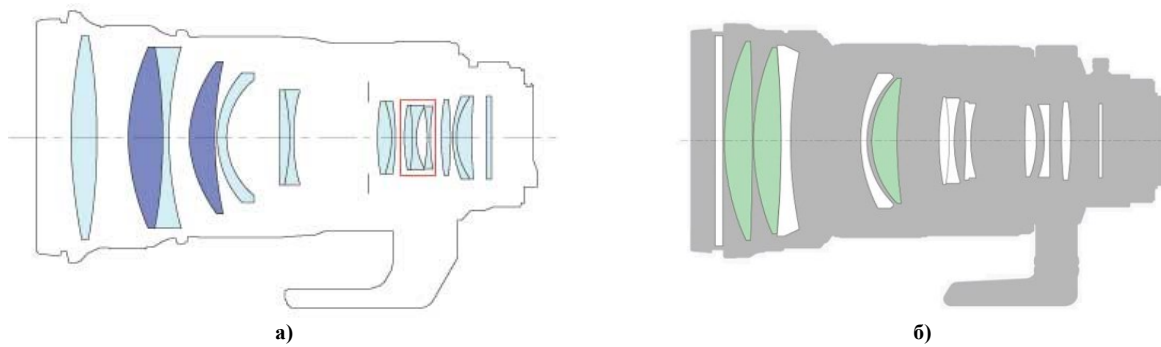


Рис. 1. Сучасні комерційні зразки телеоб'єктивів: а) телеоб'єктив компанії Canon, фокусна відстань 300 мм, F/2,8, 16 елементів в 12 компонентах, довжина 248 мм (затемнені дві лінзи виготовлені з флюориту) [6]; б) телеоб'єктив компанії Sony, фокусна відстань 300 мм, F/2,8, 13 елементів в 12 компонентах, довжина 242,5 мм (затемнені три лінзи виготовлені зі скла UD) [7]

Через складність та багатовимірність задачі проектування подібних об'єктивів, на сьогодні відсутні методики їх аналітичного розрахунку. Використання теорії аберацій 3-го порядку або архівних джерел не завжди призводить до прийняттого результату, особливо у випадку світлосильних багатолінзових систем [2, 3, 5]. Тому перспективним напрямком слід вважати розробку та застосування удосконалених програмних інструментів, в основу яких покладені сучасні алгоритми глобальної оптимізації [8–11]. Потенційно вони здатні за обмежений час забезпечити знаходження бажаного розв'язку з урахуванням додаткових вимог розробника.

В даній роботі експериментально досліджені можливості генерування виправлених на дисторсію багатолінзових оптичних систем телеоб'єктивів з фіксованою фокусною відстанню та високою якістю зображення.

Постановка задачі досліджень

Метою даної роботи є перевірка шляхом багаторазового комп'ютерного моделювання результативності автоматизованого параметричного абераційного синтезу багатолінзових ортоскопічних оптичних систем телеоб'єктивів. Параметричний синтез здійснюється засобами стохастичної глобальної оптимізації, реалізованими в спеціалізованому програмному забезпеченні.

Виклад основного матеріалу

Для розроблення оптичних систем ортоскопічних телеоб'єктивів в даній роботі було використано програмне забезпечення з проектування оптичних систем PODIL, у якому реалізовано модифікований алгоритм адаптивного методу диференційної еволюції Коші [12, 13]. Функціональні можливості даного програмного забезпечення дають змогу генерувати оригінальні оптичні схеми та знаходити конструктивні параметри удосконалених оптичних систем різного типу практично в автоматичному режимі.

Розглянемо детальніше використану послідовність проектування. Запуску алгоритму глобальної оптимізації передують підготовчий етап. На ньому конструктор спочатку має обрати загальну кількість лінз, ввести координати точок поля зору, для яких мають контролюватися аберації, тип та величину апертури оптичної системи, основну та додаткові довжини хвиль. Далі відмічаються параметри оптимізації (змінні) та встановлюються діапазони на їх допустимі значення. Як параметри оптимізації переважно використовуються радіуси оптичних поверхонь, осьові відстані між поверхнями та параметри оптичних середовищ. Додатково для модифікації можуть бути обрані специфічні параметри «нестандартних» поверхонь (наприклад, коефіцієнти асферичності, параметри дифракційних ґраток, параметри панкратичних систем тощо) [14–18].

Далі в програмі генерується базова або так звана стандартна оціночна функція. Як правило, вона формується для мінімізації середньоквадратичних радіусів світлових плям або для мінімізації функцій деформації хвильових фронтів. За потреби ця оціночна функція може бути доповнена такими додатковими складовими як обмеження типу рівностей або нерівностей для окремих аберацій або геометричних параметрів системи. Крім того, на завершальних етапах проектування оптичних систем, які мають утворювати якісне зображення, оціночна функція може містити складові елементи для мінімізації значень монохроматичних або поліхроматичних модуляційних передавальних функцій, розрахованих в геометричному або дифракційному наближенні для заданих просторових частот. По завершенню підготовчого етапу можна вже здійснити запуск вищезазначеного алгоритму глобальної оптимізації. Слід зауважити, що сама процедура оптимізації не потребує активної участі конструктора, адже є повністю автоматичною.

Для проведення чисельних досліджень в даній роботі було обрано 16-лінзовий ортоскопічний телеоб'єктив з фіксованою задньою фокусною відстанню 300 мм, діафрагмовим числом F/2,8 та кутовим

полем зору $8,4^\circ$. Цей телеоб'єктив призначений для функціонування у видимому спектральному діапазоні з основною довжиною хвилі $0,555 \text{ мкм}$. Вагові коефіцієнти для всіх п'яти використаних довжин хвиль ($0,47$; $0,51$; $0,555$; $0,61$ і $0,65 \text{ мкм}$) були встановлені однаковими.

Під час параметричного синтезу розглянутого телеоб'єктива було встановлено обмеження на загальний осьовий розмір (відстань від першої оптичної поверхні телеоб'єктива до площини зображень) – 285 мм , фіксоване значення заднього фокального відрізка – 58 мм , мінімальну та максимальну осьові товщини лінз – $2,8 \text{ мм}$ і 23 мм відповідно, мінімальну товщину лінз на краю – 2 мм та максимальне допустиме значення дисторсії – $0,01\%$. Для забезпечення близького до телецентричного ходу променів на виході системи, граничне значення кута головного променя периферійного пучка в просторі зображень обмежувалося значенням 9° .

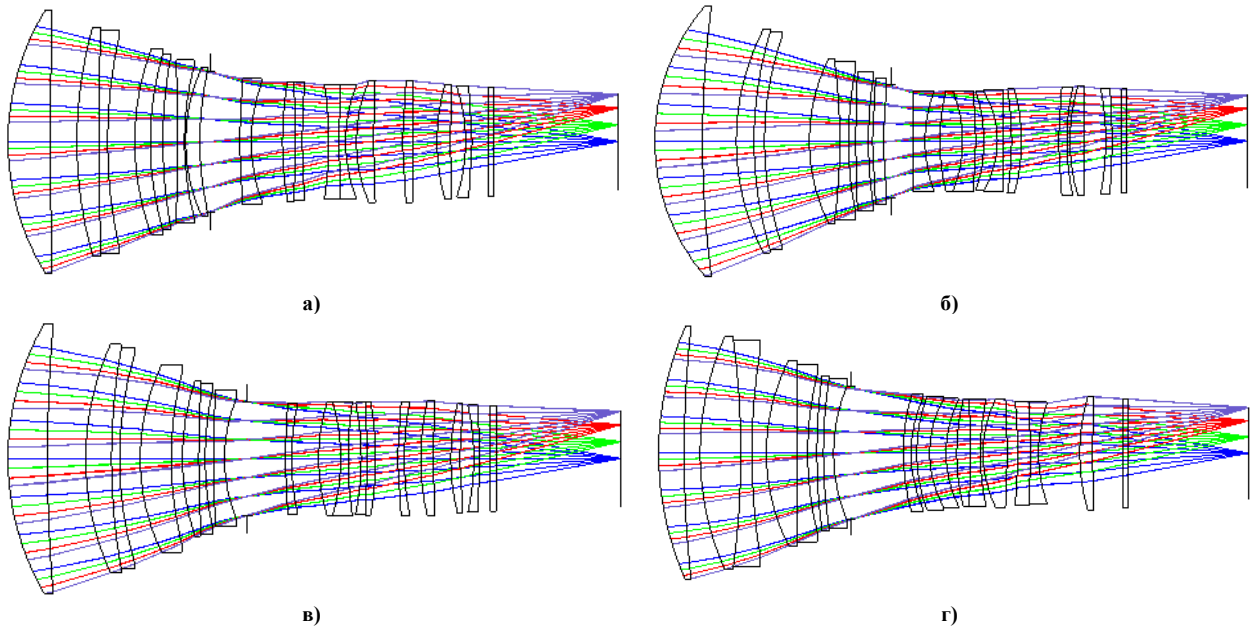


Рис. 2. Варіанти розроблених оптичних схем телеоб'єктивів з ходом променів

Застосування регулятора, що контролює вихідний кут апертурного променя на останній оптичній поверхні об'єктива, гарантувало незмінність значення задньої фокусної відстані телеоб'єктива. Зокрема, в даному випадку, тангенс зазначеного кута становив $-0,17855$ при діаметрі вхідної зіниці $107,14 \text{ мм}$.

Проведене багаторазове комп'ютерне моделювання процесу розрахунку показало, що процедура глобальної оптимізації з кількістю змінних біля 90 потребує значних обчислювальних затрат та суттєвої потужності комп'ютера. Так, при роботі процесора Intel Core i9-9900K в багатопотоковому режимі та оптимізації значень модуляційних передавальних функцій процедура синтезу може перевищувати 50 годин.

На рис. 2 представлені отримані оптичні схеми декількох варіантів ортоскопічних телеоб'єктивів.

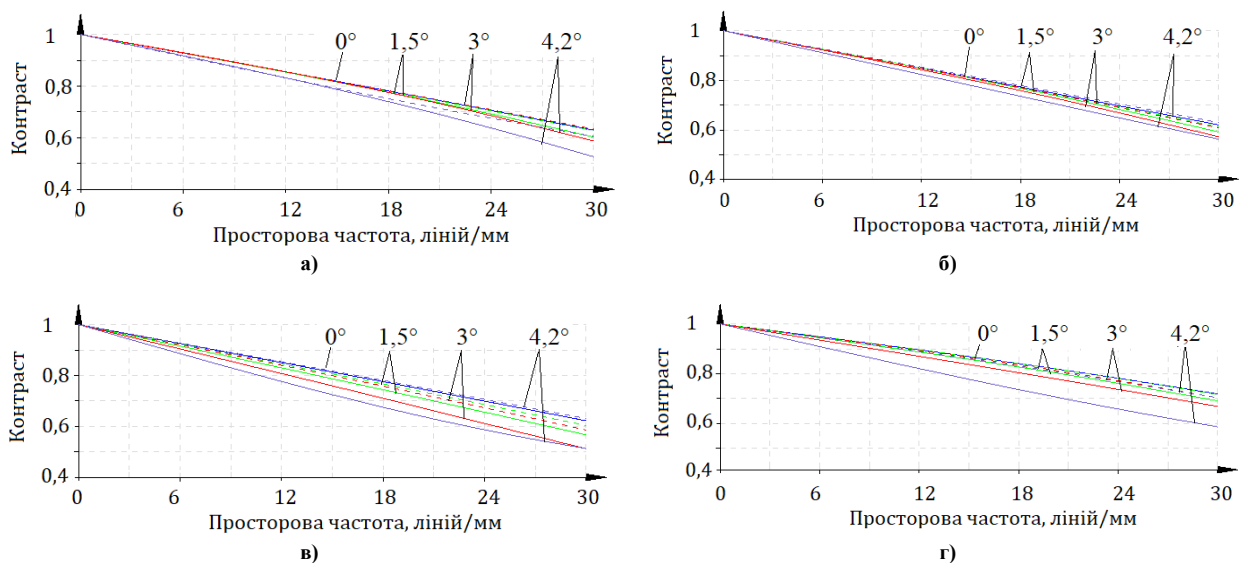


Рис. 3. Графіки дифракційних поліхроматичних модуляційних передавальних функцій розроблених варіантів телеоб'єктивів для різних точок поля зору

Максимальне по модулю значення відносної дисторсії синтезованих варіантів телеоб'єктивів не перевищує 0,017%. На рис. 3 представлені графіки дифракційних поліхроматичних модуляційних передавальних функцій розроблених телеоб'єктивів для точок поля зору в центрі, середній зоні та на периферії. Ці графіки свідчать про досягнуту якісну корекцію аберацій в широкому спектральному діапазоні. Зокрема, у всіх розглянутих випадках значення дифракційних поліхроматичних модуляційних передавальних функцій для просторової частоти 30 ліній/мм виявилися більшими за 0,5 по всьому полю зображень.

Як показують залежності, показані на рис. 4 і 5, якість зображення є добре збалансованою по всьому полю зору.

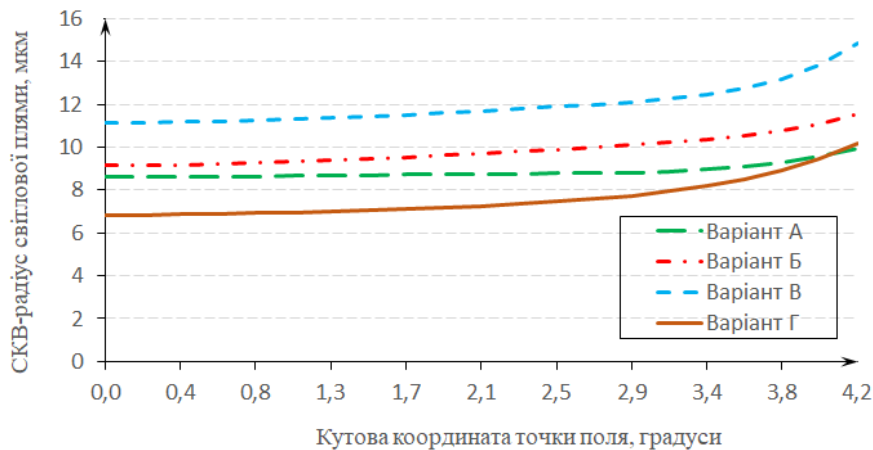


Рис. 4. Залежності СКВ-радіусів поліхроматичних світлових плям від кута поля розроблених варіантів телеоб'єктивів

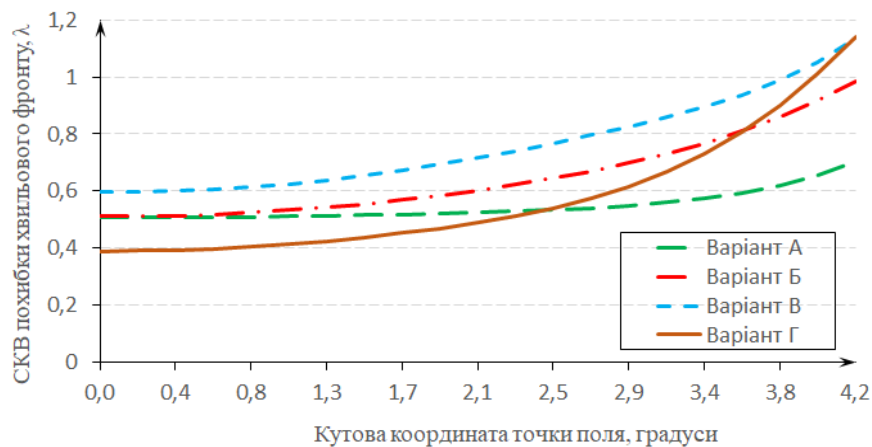


Рис. 5. Залежності СКВ похибки поліхроматичної функції деформації хвильового фронту від кута поля розроблених варіантів телеоб'єктивів

Висновки

Використаний в роботі спосіб автоматизованого параметричного синтезу оптичних систем, що базується на алгоритмі стохастичної глобальної оптимізації, дозволяє отримати оптичні схеми багатолінзових ортоскопічних телеоб'єктивів з урахуванням встановлених конструктором вимог та обмежень. Розроблені варіанти 16-лінзових телеоб'єктивів з фокусною відстанню 300 мм та відносним отвором 1:2,8 забезпечують високий рівень корекції монохроматичних та хроматичних аберацій для кутового поля зору $8,4^\circ$ без будь-якого віньетування променів та використання флюориту. Отримані оптичні системи раціонально застосовувати в високоякісних оптико-електронних приладах спостереження за віддаленими об'єктами разом з повнокадровими матричними фотоприймачами, що мають діагональ світлочувливої площадки біля 44 мм.

Література

1. Laikin M. Lens Design (Optical Science and Engineering). 4th Edition. CRC Press. 2006. 512 p.
2. Velzel C., William T. Rhodes A Course in Lens Design. Georgia Institute of Technology. 2014. 177 p.
3. Kingslake R., Johnson R. B. Lens Design Fundamentals. Second Edition. Elsevier Inc. 2010. 549 p.
4. Malacara D., Malacara Z. Handbook of Lens Design. Taylor & Francis, 1994. 672 p.
5. Gross H., Zugge H., Peschka M., Blechinger F. Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration

Theory and Correction of Optical Systems. Edited by Herbert Gross. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 2014. 780 p.

6. Canon EF 300mm F2.8 IS II USM Lens. EFLens.com. 2022. URL: http://www.eflens.com/ef-lenses/ef_300_f_2_8_is_ii_usm.html
7. Sony 300mm F2.8 G SSM II Lens. DigitalPhotographyLives. 2022. URL: <https://digitalphotographylive.com/sony-300mm-f2-8-g-ssm-ii-sal300f28g2-lens/>
8. Bentley J., Craig Olson C. Field Guide to Lens Design. SPIE Field Guides. Volume FG27. SPIE. 2012. 141 p.
9. Price K., Storn R., Lampinen J. Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization. Springer Science & Business Media, 2006. 539 p.
11. 10 Xin-She Yang. Optimization Techniques and Applications with Examples. John Wiley & Sons, Inc. 2018. 384 p.
12. Slowik A. Swarm Intelligence Algorithms: Modifications and Applications. CRC Press. 2020. 378 p.
13. Choi T. J., Ahn C. W. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm for global numerical optimization/ The Scientific World Journal. 2013. Vol. 2013. Article ID 969734, 12 pages.
14. Choi T. J., Ahn C. W. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm with bias strategy adaptation mechanism for global numerical optimization/ Journal of Computers. 2014. Vol. 9, part 9. p. 2139-2145.
15. Сокуренько В. М., Буйлов І. С. Застосування адаптивного методу диференційної еволюції Коші для розрахунку об'єктивів. Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. 2016. № 51(1). С. 41-47.
16. Сокуренько В. М., Макаренко Я. І. Розробка оптичних систем методами глобальної оптимізації. Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. 2015. № 50(2). С. 51-60.
17. Сокуренько В. М., Смажко І. О. Автоматизований розрахунок оптичної системи SWIR-об'єктива. Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки. Хмельницький, 2019. № 6 (279). С. 202-205.
18. Сокуренько В. М., Бондарчук Д. П. Автоматизований параметричний синтез фотооб'єктива зі зменшеною дисторсією. Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. 2018. № 56(2). С. 18-24.
19. Сокуренько В. М., Сокуренько О. М. Автоматизований розрахунок оптичної системи панкратичного прицілу. Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування. 2022. № 63(1). С. 25-33.

References

1. Laikin M. Lens Design (Optical Science and Engineering). 4th Edition. CRC Press. 2006. 512 p.
2. Velzel C., William T. Rhodes A Course in Lens Design. Georgia Institute of Technology. 2014. 177 p.
3. Kingslake R., Johnson R. B. Lens Design Fundamentals. Second Edition. Elsevier Inc. 2010. 549 p.
4. Malacara D., Malacara Z. Handbook of Lens Design. Taylor & Francis, 1994. 672 p.
5. Gross H., Zugge H., Peschka M., Blechinger F. Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration Theory and Correction of Optical Systems. Edited by Herbert Gross. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 2014. 780 p.
6. Canon EF 300mm F2.8 IS II USM Lens. EFLens.com. 2022. URL: http://www.eflens.com/ef-lenses/ef_300_f_2_8_is_ii_usm.html
7. Sony 300mm F2.8 G SSM II Lens. DigitalPhotographyLives. 2022. URL: <https://digitalphotographylive.com/sony-300mm-f2-8-g-ssm-ii-sal300f28g2-lens/>
8. Bentley J., Craig Olson C. Field Guide to Lens Design. SPIE Field Guides. Volume FG27. SPIE. 2012. 141 p.
9. Price K., Storn R., Lampinen J. Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization. Springer Science & Business Media, 2006. 539 p.
11. 10 Xin-She Yang. Optimization Techniques and Applications with Examples. John Wiley & Sons, Inc. 2018. 384 p.
12. Slowik A. Swarm Intelligence Algorithms: Modifications and Applications. CRC Press. 2020. 378 p.
13. Choi T. J., Ahn C. W. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm for global numerical optimization/ The Scientific World Journal. 2013. Vol. 2013. Article ID 969734, 12 pages.
14. Choi T. J., Ahn C. W. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm with bias strategy adaptation mechanism for global numerical optimization/ Journal of Computers. 2014. Vol. 9, part 9. p. 2139-2145.
15. Sokurenko V. M., Builov I. S. Zastosuvannia adaptivnoho metodu dyferentsiinoi evoliutsii Koshi dlia rozrakhunku obiektyviv. Visnyk NTUU "KPI". Seriiia prykladobuduvannia. 2016. № 51(1). S. 41-47.
16. Sokurenko V. M., Makarenko Ya. I. Rozrobka optychnykh system metodamy hlobalnoi optymizatsii. Visnyk NTUU "KPI". Seriiia prykladobuduvannia. 2015. № 50(2). S. 51-60.
17. Sokurenko V. M., Smazhko I. O. Avtomatyzovanyi rozrakhunok optychnoi systemy SWIR-obiektyva. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu: Tekhnichni nauky. Khmelnytskyi, 2019. № 6 (279). S. 202 205.
18. Sokurenko V. M., Bondarchuk D. P. Avtomatyzovanyi parametrychnyi syntezy fotoobiektyva zi zmenshenoiu dystorsiieiu. Visnyk NTUU "KPI". Seriiia prykladobuduvannia. 2018. № 56(2). S. 18-24.
19. Sokurenko V. M., Sokurenko O. M. Avtomatyzovanyi rozrakhunok optychnoi systemy pankratychnoho prytsilu. Visnyk Kyivskoho politekhnichnoho instytutu. Seriiia Prykladobuduvannia. 2022. № 63(1). S. 25-33.