

СОКУРЕНКО Вячеслав

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

КРИЖНИЙ Андрій

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

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ШИРОКОКУТНИХ ОКУЛЯРІВ З ПОЛЕМ ЗОРУ 90°

В даній роботі здійснено параметричний абераційний синтез серії оптичних систем ширококутних окулярів з різною кількістю лінз для використання у телескопах або мікроскопах. Окуляри забезпечують кутове поле зору 90°, видиме збільшення 17,9×, діаметр вихідної зіниці 4 мм та її віддалення 16 мм. Під час розрахунку оптичних систем висувалися вимоги до корекції тета-дисторсії та досягнення найвищої якості зображення. Процес синтезу здійснювався за допомогою алгоритму еволюційної глобальної оптимізації, реалізованого в програмному забезпеченні для проектування оптичних систем PODIL. Отримані результати розрахунку основних аберацій та функцій якості підтверджують високу якість зображення синтезованих окулярів.

Ключові слова: ширококутний окуляр, F-тета дисторсія, поле зору, МПФ, параметричний синтез, автоматизація.

SOKURENKO Vyacheslav, KRYZHNIY Andriy

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

AUTOMATED PARAMETRIC SYNTHESIS OF WIDE-ANGLE EYEPIECES WITH 90-DEG FIELD OF VIEW

Designing a wide-angle eyepiece's optical system is a multidimensional problem that cannot currently be solved analytically. The final solution should meet specific requirements on the distortion properties, as well as different user-defined restrictions: overall dimensions, lateral color, etc. To solve this problem, we propose to apply one of the global optimization algorithms, which excludes the necessity of having initial solutions with good image quality. In this work, we carry out parametric aberration synthesis of a series of wide-angle eyepieces with a different number of lenses for use in telescopes or microscopes. All optical systems provide the 90-degree angular field of view, the 17.9× magnification, the 4-mm exit pupil diameter, and the 16-mm eye relief. The parametric synthesis process itself was carried out in an automated mode with the global optimization algorithm based on modified differential evolution. This algorithm was implemented and examined earlier in software PODIL intended for optical systems design. The computer simulations showed that the time interval necessary for automated designing such eyepieces (with a total number of unknown variables up to 60) is about 20 hours. The evaluated aberrations and image quality functions confirmed the high image quality of the designed optical systems of the developed wide-angle eyepieces. The user-defined technical requirements and restrictions set in the merit function are completely met in found solutions. All developed optical systems are well corrected on theta distortion: its value does not exceed 0.6% over the whole field. Future research can be directed onto testing automated design capabilities for other types of optical systems with extreme performances.

Keywords: wide-angle eyepiece, F-theta distortion, field of view, MTF, parametric synthesis, automation.

Вступ

У мікроскопії та астрономії для спостереження об'єктів з широким полем огляду часто застосовуються ширококутні окуляри. Їх поле зору в просторі зображень, зазвичай, перевищує 70° [1, 2].

Оптична система ширококутного окуляра має забезпечувати додаткове збільшення зображення, сформованого попередніми оптичними компонентами, та перетин головних променів пучків під суттєвими кутами (більше 35°) на фіксованій відстані від окуляра. В зв'язку з цим, важливими функціональними параметрами окулярів є задня фокусна відстань, кутове поле зору, діаметр та віддалення зіниці тощо [3].

Під час проектування оптичних систем ширококутних окулярів особлива увага має приділятися корекції дисторсії. При кутах поля зору, що перевищують 80°, часто виправляється вже не класична дисторсія, а F-тета дисторсія. Коригування останньої забезпечує лінійну залежність розмірів зображення від кута нахилу пучка відносно оптичної осі. При цьому ідентичні об'єкти, розташовані в центрі поля зору та на периферії, будуть мати практично однакові кутові розміри.

На сьогодні поширеними є декілька типів ширококутних окулярів. Вони можуть відрізнятися як будовою своєї оптичної системи, так і габаритними розмірами [4–6]. На рис. 1 показано зовнішній вигляд декількох відомих зразків, які пропонуються провідними компаніями. Наведені ширококутні окуляри забезпечують відмінну якість зображення та мають кутове поле більше за 80°.

Через потенційно високу вартість та можливі енергетичні втрати світла, загальна кількість лінз в оптичних системах ширококутних окулярів рідко перевищує 10. Разом з тим, такі системи мають забезпечувати високу якість зображення та відносно невелику дисторсію, а тому мають загальну кількість лінз не менше 7.



Рис. 1. Сучасні комерційні зразки ширококутних окулярів провідних виробників: а) Celestron Luminos 15mm Eyepiece (1.25") компанії Celestron, LLC [4]; б) Nagler Type-4 17mm Eyepiece (2") компанії Tele Vue Optics, Inc. [5]; в) Scientific 82° Series 14 mm Eyepiece (1.25") компанії Explore Scientific, LLC [6]

Наразі, на жаль, не існує універсальних математичних методик розрахунку подібних багатолінзових оптичних систем з урахуванням різних обмежень та технічних вимог. Конструктору доводиться використовувати свій досвід, архівні (патентні) матеріали та покладатися на сучасні алгоритми, закладені в потужні пакети проєктування оптичних систем.

Постановка проблеми

В даній роботі пропонується здійснити перевірку можливості автоматизованого абераційного синтезу багатолінзових оптичних систем ширококутних окулярів з високою якістю зображення, виправлених на F-тета дисторсію.

Автоматизація розрахунків може бути потенційно досягнута за рахунок використання одного з сучасних алгоритмів глобальної оптимізації [7–9], реалізованого у спеціалізованому програмному забезпеченні з розрахунку оптичних систем.

Мета даної роботи – експериментальне дослідження (шляхом комп'ютерного моделювання) ефективності автоматизації процедури параметричного синтезу багатолінзових ширококутних окулярів з потрібними функціональними параметрами без використання будь-яких якісних стартових оптичних систем.

Виклад основного матеріалу

В даній роботі було проведено перевірку можливості автоматизованого розрахунку багатолінзових оптичних систем ширококутних окулярів, які призначені для роботи в видимому спектральному діапазоні. Для моделювання були обрані окуляри з кутовим полем зору 90° та видимим збільшенням $17,9\times$. У всіх системах зіниця ока мала діаметр 4 мм та була віддалена від окуляра на 16 мм.

Для оптичних систем окулярів розрахунок та аналіз аберацій часто виконують в зворотному ході променів, адже в прямому ході такі системи мають нескінченно віддалені площини зображень. В зв'язку з цим, в даному випадку вхідні зіниці розглянутих оптичних систем збігалися з апертурною діафрагмою, в ролі якої виступала зіниця ока.

Параметричний синтез здійснювався за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення «PODIL», призначеного для проєктування оптичних систем. Зокрема, процес розрахунку проводився в автоматичному режимі з використанням модифікованого еволюційного алгоритму глобальної оптимізації. Раніше подібний підхід був успішно застосований під час автоматизованого розрахунку як окулярів, так й інших типів оптичних систем [10–13].

Вихідними даними для параметричного абераційного синтезу були встановлені такі параметри та обмеження, які були використані під час чисельного моделювання:

- загальна кількість лінз – 7, 8, 9 і 10;
- кутове поле зору в просторі предметів – 90° ;
- спектральний діапазон – видимий (0,47...0,65 мкм);
- видиме збільшення – $17,9\times$;
- діаметр апертурної діафрагми (зіниці ока) – 4 мм;
- віддалення апертурної діафрагми від окуляра – 16 мм;
- діапазон допустимих осьових товщин лінз – 2...16 мм;

- діапазон допустимих осьових повітряних проміжків – 0,1...20 мм;
- діапазон кривизни оптичних поверхонь – (-0,05...0,05) мм;
- мінімальна товщина лінз на краю – 2 мм;
- мінімальна товщина повітряних проміжків на краю – 1 мм;
- максимальне осьова товщина системи – 114 мм;
- максимальне значення відносної тета-дисторсії по полю для основної довжини хвилі – 0,5%.

Зрозуміло, що задане значення видимого збільшення $17,9\times$ відповідає задній фокусній відстані, що дорівнює $250/17,9=14$ мм. Під час пошуку розв'язку зазначена фокусна відстань системи була зафіксована регулятором радіусу останньої оптичної поверхні, який гарантував незмінне значення кута апертурного променя на виході. Зокрема, при заданому діаметрі вхідної зіниці (4 мм) тангенс цього кута становив $-0,125$.

Слід також зазначити, що при таких великих кутах поля зору оптичні системи сучасних окулярів часто мають в зворотному ході променів уявну площину зображень. Тому від'ємна величина віддалення площини зображень від останньої оптичної поверхні також була серед параметрів оптимізації.

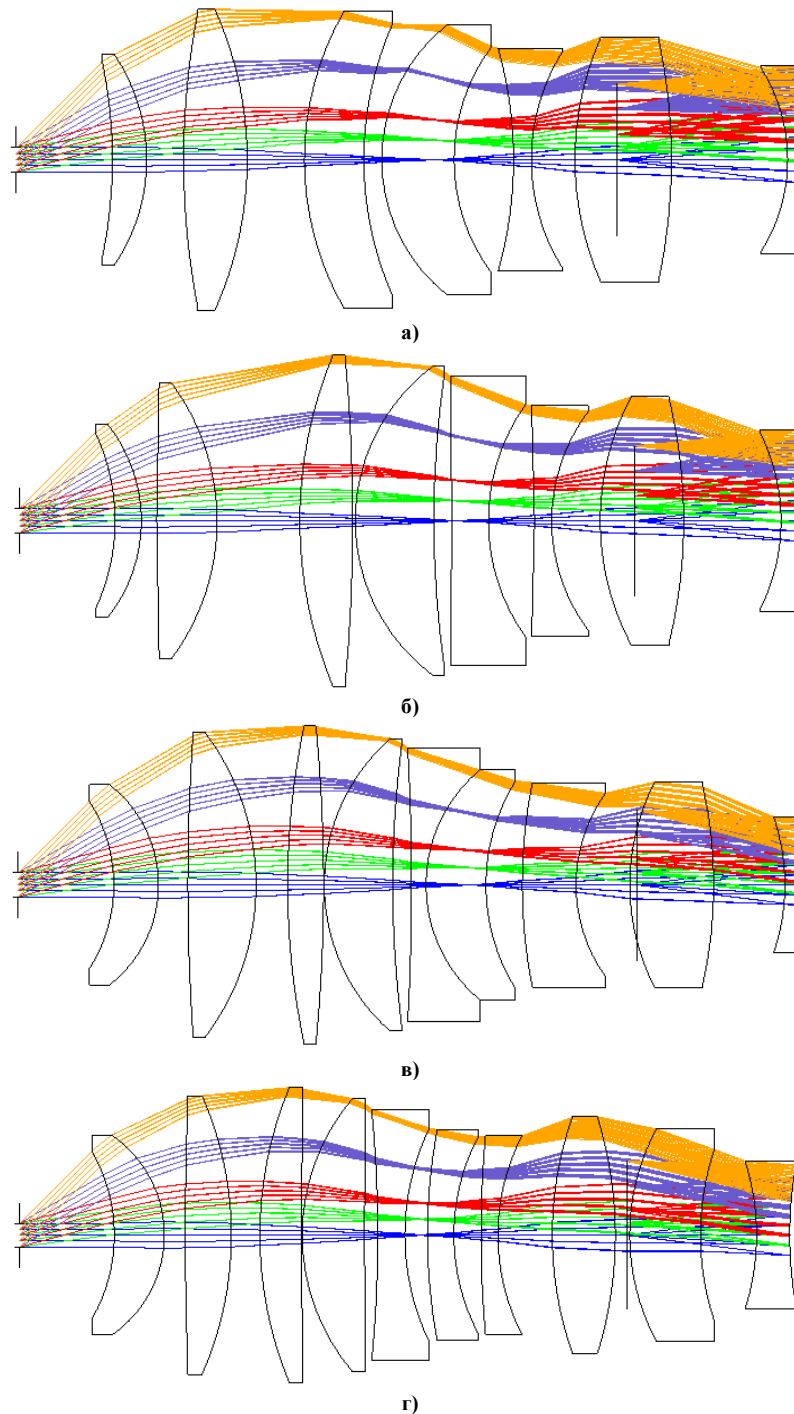


Рис. 2. Оптичні схеми синтезованих ширококутних окулярів з ходом осьових та позаосьових пучків променів (показано в зворотному ході променів): а) семилінзового; б) восьмилінзового; в) дев'ятилінзового; г) десятилінзового

Параметричний абераційний синтез оптичних систем здійснювався у два етапи. На першому етапі стартові оптичні схеми задавалися довільно у формі плоско-паралельних пластин.

Оціночна функція генерувалася для мінімізації середньоквадратичних значень радіусів точкових діаграм з пошуком найкращих марок скла з каталогів SCHOTT і CDGM та урахуванням обмежень на конструктивні параметри та тета-дисторсію. Додатково були встановлені складові для зменшення хроматизму збільшення на краю поля зору. Ці складові по суті зводилися до мінімізації відхилень поперечних координат головних променів в площині зображень для різних довжин хвиль.

Далі алгоритмом еволюційної глобальної оптимізації в автоматичному режимі детально досліджувався заданий багатовимірний простір пошукових параметрів з розміром популяції 100 на кожну змінну. Процедура такого пошуку потребувала декількох годин роботи програми в багатопоточному режимі на комп'ютері з процесором Intel Core i9-9900K.

На другому етапі оціночна функція доповнювалася складовими елементами для поліпшення значень поліхроматичних модуляційних передавальних функцій для різних точок поля зору на фіксованій просторовій частоті (в даному випадку – 20 ліній/мм). На даному етапі розмір популяції був вже суттєво зменшений (до 30 точок на кожну змінну).

Оптичні схеми серії окулярів, знайдені як оптимальні розв'язки, показані на рис. 2.

Графіки дифракційних поліхроматичних модуляційних передавальних функцій, представлені на рис. 3, а числові значення основних аберацій – в табл. 1. В цілому, наведені результати свідчать про досягнутий ступінь корекції аберацій та високу якість зображення отриманих оптичних систем.

Таблиця 1

Лінійні розміри світлових плям розсіювання та максимальне значення дисторсії

Варіант оптичної системи	Максимальне значення середньоквадратичного радіусу світлової плями у всьому спектральному діапазоні, мкм		Максимальне по модулю значення відносної F-тета дисторсії для основної довжини хвилі, %
	на оптичній осі	по всьому полю зору	
Семилінзовий	3,4	9,3	0,51
Восьмилінзовий	2,4	8,3	0,51
Дев'ятилінзовий	2,3	7,7	0,56
Десятилінзовий	3,8	7,2	0,55

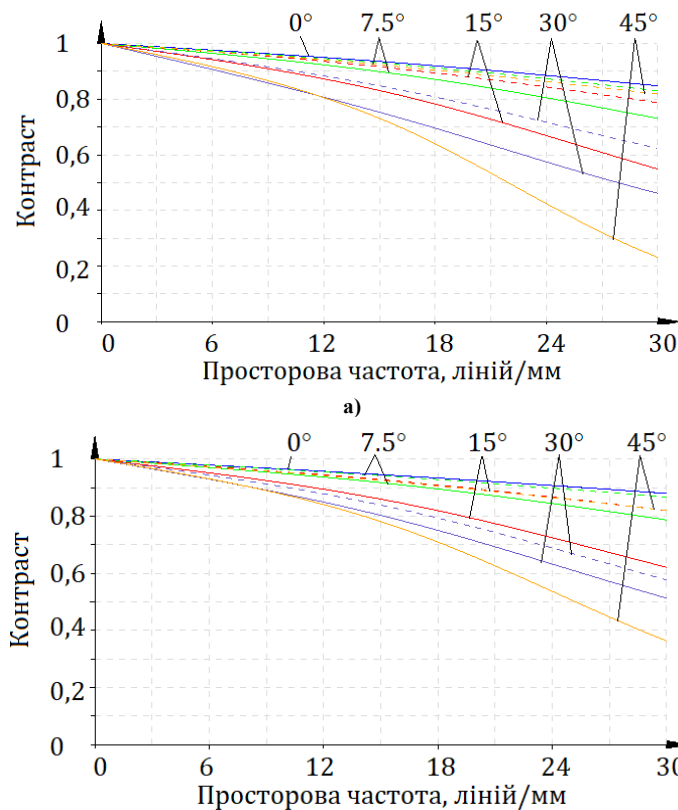


Рис. 3. Графіки дифракційних поліхроматичних модуляційних передавальних функцій синтезованих ширококутних окулярів для різних точок поля зору: а) семилінзового; б) восьмилінзового;

Суцільними кривими показані залежності для меридіонального перетину, а пунктирними – для сагітального перетину

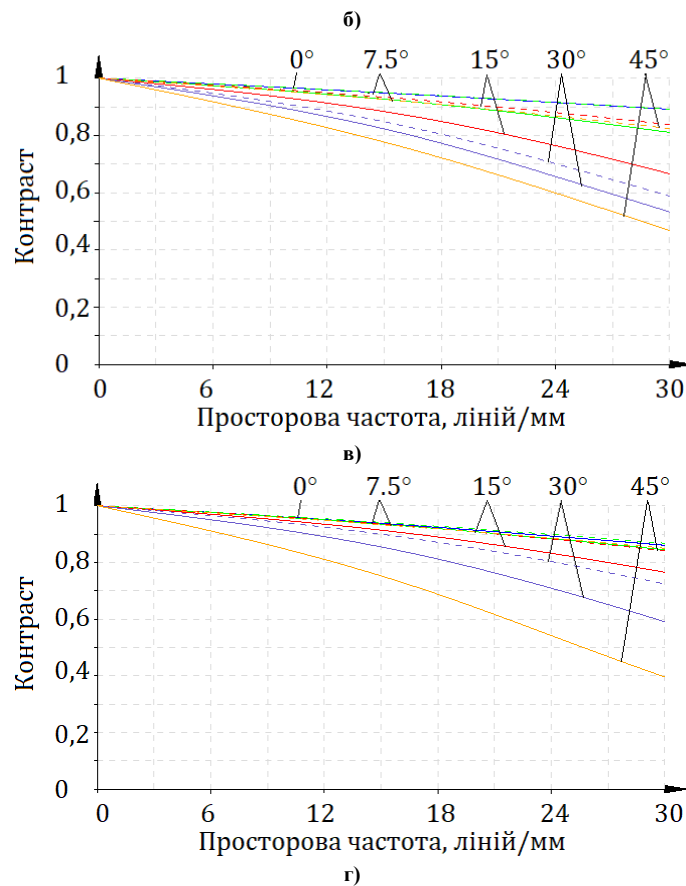


Рис. 3. Графіки дифракційних поліхроматичних модуляційних передавальних функцій синтезованих ширококутних окулярів для різних точок поля зору (продовження):
в) дев'ятилінзового; г) десятилінзового. Суцільними кривими показані залежності для меридіонального перетину, а пунктирними – для сагітального перетину

Як видно з табл. 1, отримані числові значення відносної тета-дисторсії дещо перевищили задане обмеження 0,5%. Це зумовлено невеликим значенням вагового коефіцієнта елемента оціночної функції, який застосовувався для обмеження максимального значення дисторсії в чотирьох точках поля зору (зокрема, для відносних координат поля зору: 0,5; 0,7; 0,88 і 1).

В цілому, наведені результати свідчать про досягнуту відмінну якість зображення синтезованих оптичних систем ширококутних окулярів.

Висновки

Проведений параметричний абераційний синтез серії виправлених на тета-дисторсію багатолінзових оптичних систем ширококутних окулярів підтвердив на практиці ефективність автоматизованого розрахунку подібних систем за допомогою програмного забезпечення PODIL.

Отримані результати вказують на високу якість зображень розрахованих оптичних систем ширококутних окулярів та можливість урахування в кінцевому розв'язку встановлених конструктором технічних вимог та обмежень.

Перевагами синтезованих систем є велике кутове поле зору (90°), значне віддалення зіниці (16 мм) та мале значення тета-дисторсії, що не перевищує 0,6% по полю.

Література

1. Paolini W. Choosing and Using Astronomical Eyepieces. Springer Science & Business Media, New York, 2013. 442 p.
2. Ultra Wide Field Eyepieces. OPT Telescopes. 2022. URL: <https://optcorp.com/collections/ultra-wide-field-eyepieces>.
3. Choosing an Eyepiece – Step by Step. Al Nagler. Tele Vue Optics. 2014. URL: https://www.televue.com/pdf/Eyepiece_AASNY_2014_May_June_ChoosingEPs.pdf
4. Celestron Luminos 15mm Eyepiece (1.25"). Celestron, LLC. 2022. URL: <https://www.celestron.com/products/luminos-15mm-eyepiece-125in>
5. Tele Vue Nagler Type-4 17mm Eyepiece (2") Overview. Tele Vue Optics, Inc. 2022. URL: https://www.bhphotovideo.com/c/product/329433-REG/Tele_Vue_EN4_17_0_Nagler_Type_4_17mm.html#:~:text=Inspired%20by%20the%20venerable%20Nagler,

optimized%20for%20deep-sky%20viewing

6. Scientific 82° Series 14 mm Eyepiece (1.25"). Explore Scientific, LLC. 2022. URL: <https://explorescientificusa.com/products/82-14mm>

7. Haupt R, Haupt S. Practical Genetic Algorithms. 2004. 253 p.

8. Ali M., Zabinsky B. A numerical Evaluation of Several Stochastic Algorithms on Selected Continuous Global Optimization Test Problems. J. of Global Optimization. 2005. Vol. 31. P. 635–672.

9. Сокурєнко В. М., Неділюк В. С. Числове дослідження стохастичних методів безперервної глобальної оптимізації. Наукові вісті НТУУ "КПІ". 2012. № 1. С. 81-88.

10. Сокурєнко В. М., Макаренко Я. І. Розробка оптичних систем методами глобальної оптимізації. Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. 2015. № 50(2). С. 51-60.

11. Сокурєнко В. М., Буйлов І. С. Застосування адаптивного методу диференційної еволюції Коші для розрахунку об'єктів. Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. 2016. № 51(1). С. 41-47.

12. Сокурєнко В. М., Вакуленко М. М. Автоматизований розрахунок окулярів з дифракційними оптичними елементами. Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки. Хмельницький, 2018. №1 (257). С. 107-112.

13. Сокурєнко В. М., Тросянська О. В. Синтез оптичної системи окуляра для мікродисплея з високою роздільною здатністю. Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки. Хмельницький, 2019. № 6 (279). С. 206-210.

References

1. Paolini W. Choosing and Using Astronomical Eyepieces. Springer Science & Business Media, New York, 2013. 442 p.

2. Ultra Wide Field Eyepieces. OPT Telescopes. 2022. URL: <https://optcorp.com/collections/ultra-wide-field-eyepieces>.

3. Choosing an Eyepiece – Step by Step. Al Nagler. Tele Vue Optics. 2014. URL: https://www.televue.com/pdf/Eyepiece_AASNY_2014_May_June_ChoosingEPs.pdf

4. Celestron Luminos 15mm Eyepiece (1.25"). Celestron, LLC. 2022. URL: <https://www.celestron.com/products/luminos-15mm-eyepiece-125in>

5. Tele Vue Nagler Type-4 17mm Eyepiece (2") Overview. Tele Vue Optics, Inc. 2022. URL: https://www.bhphotovideo.com/c/product/329433-REG/Tele_Vue_EN4_17_0_Nagler_Type_4_17mm.html#:~:text=Inspired%20by%20the%20venerable%20Nagler,optimized%20for%20deep-sky%20viewing

6. Scientific 82° Series 14 mm Eyepiece (1.25"). Explore Scientific, LLC. 2022. URL: <https://explorescientificusa.com/products/82-14mm>

7. Haupt R, Haupt S. Practical Genetic Algorithms. 2004. 253 p.

8. Ali M., Zabinsky B. A numerical Evaluation of Several Stochastic Algorithms on Selected Continuous Global Optimization Test Problems. J. of Global Optimization. 2005. Vol. 31. P. 635–672.

9. Sokurenko V. M., Nediliuk V. S. Chyslove doslidzhennia stokhastychnykh metodiv bezperervnoi hlobalnoi optymizatsii. Naukovi visti NTUU "KPI". 2012. № 1. С. 81-88.

10. Sokurenko V. M., Makarenko Ya. I. Rozrobka optychnykh system metodamy hlobalnoi optymizatsii. Visnyk NTUU "KPI". Seriiia pryladobuduvannia. 2015. № 50(2). С. 51-60.

11. Sokurenko V. M., Builov I. S. Zastosuvannia adaptynoho metodu dyferentsiinoi evoliutsii Koshi dlia rozrakhunku obiektyviv. Visnyk NTUU "KPI". Seriiia pryladobuduvannia. 2016. № 51(1). С. 41-47.

12. Sokurenko V. M., Vakulenko M. M. Avtomatyzovanyi rozrakhunok okuliariv z dyfraktsiinymy optychnymy elementamy. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu: Tekhnichni nauky. Khmelnytskyi, 2018. №1 (257). С. 107-112.

13. Sokurenko V. M., Trostianska O. V. Syntez optychnoi systemy okuliara dlia mikrodyspleia z vysokoioi rozdilnoiu zdattistiu. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu: Tekhnichni nauky. Khmelnytskyi, 2019. № 6 (279). С. 206-210.