

**РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ**

УДК 519.6

**В. М. Сокурєнко<sup>1</sup>**  
**О. Є. Стріха<sup>1</sup>****РОЗРОБКА ОБ'ЄКТИВІВ З ВИПРАВЛЕНОЮ ДИСТОРСІЄЮ**<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Запропоновано здійснювати автоматизований розрахунок оптичних систем об'єктивів зі зменшеною дисторсією за допомогою одного із сучасних алгоритмів глобальної оптимізації, а саме адаптивного методу диференційної еволюції Коші. Завдяки використанню спеціального програмного забезпечення в автоматизованому режимі виконано експериментальну перевірку дієздатності такого підходу на прикладах розрахунку об'єктивів, аналогічних тим, що вже запатентовані. Інтервал часу, витрачений на розробку оптичної системи з кількістю пошукових параметрів від 20 до 30, не перевищує декількох годин. Результати проведених досліджень свідчать про те, що вищезазначений алгоритм є ефективним інструментом, який дозволяє виконати автоматизований параметричний синтез та визначити конструктивні параметри оптичної системи з виправленою дисторсією та високою якістю зображення.

**Ключові слова:** дисторсія, об'єктив, оптична система, автоматизований розрахунок, глобальна оптимізація.

**Вступ**

Дисторсія є, як відомо, аберацією, що не порушує гомоцентричності світлових пучків, а лише викривляє геометричну подібність між зображенням і предметом [1, 2]. Одна із галузей виробництва, що потребує застосування якісних проєкційних оптичних систем (ОС) з виправленою дисторсією — це технологія виробництва, що ґрунтується на принципах фотолітографії. Такі системи застосовуються у виробництві багатьох пристроїв сучасної електроніки, як мініатюрних мікросхем, так й габаритних дисплеїв. Для ОС такого класу висувається не лише вимога забезпечення високоточного перетворення «тонкої структури» об'єкта, але вимога збереження геометричної подібності між зображенням і предметом.

Складність корекції дисторсії полягає в тому, що ця аберация проявляється у викривленні зображення з нелінійною залежністю від поля зору ОС. Одним з методів виправлення дисторсії є використання багатолінзових систем. Прикладом такого пристрою є високоапертурний об'єктив мікроскопа, який працює в глибокому ультрафіолеті (250 нм), описаний в патенті США 6822805 компанії Olympus Corporation [3] (рис. 1).

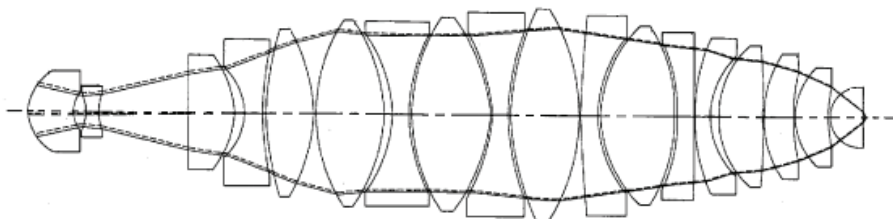


Рис. 1. Оптична схема об'єктива мікроскопа (патент США 6822805 [3])

Поширеним є метод розрахунку ОС, що базується на основі теорії абераций 3-го та 5-го порядків [4—6]. Інший підхід зводиться до використання поверхонь з особливими властивостями та компонентів (менісків) зі значною товщиною [7]. В сучасних об'єктивах, в тому числі зі змінною фокусною відстанню, дисторсія може також коригуватися застосуванням асферичних поверхонь.

Одним з аналітичних методів дослідження та аналізу дисторсії є її розкладання за поліномами, ортогональними по полю. Мінімізація коефіцієнтів такого розкладання дозволяє скоригувати дисторсію одразу по всьому полю. Систему ортогональних типу поліномів Цернике, що залежать від координат поля та зіниці, використано в роботі [8].

Недоліком розглянутих методів виправлення дисторсії є необхідність використання хороших базових (стартових) ОС з помірною дисторсією та/або наявністю досвіду і навіть інтуїції у розробника.

На сьогодні повна автоматизація процедури проектування довільної ОС зі скоригованою дисторсією аналітичним способом є, на жаль, практично неможливою через складність та громіздкість поставленої задачі. На практиці для розв'язання задачі параметричного синтезу доводиться більше покладатися на використання потужних комп'ютерів та спеціального програмного забезпечення. Останнє значно покращило та пришвидшило розробку ОС (в тому числі й зі зменшеною дисторсією), проте вищезазначені складнощі розрахунку багато в чому залишилися.

Відома значна кількість комерційних програм для автоматизованого проектування оптичних систем з потужними засобами оптимізації: CODE V<sup>®</sup> компанії Synopsys' Optical Solutions Group, Zemax OpticStudio<sup>®</sup> компанії Zemax LLC, OLSO<sup>®</sup> компанії Lambda Research Corporation, OpTaliX<sup>®</sup> компанії Optenso тощо [9—12]. Проте, на жаль, закладені в них алгоритми глобальної оптимізації (такі як «Global Sythesis», «Global Optimization», «Hammer Optimization», «Global Explorer») детально не розкриваються або ж зовсім не передбачені (як в програмі OpTaliX). Тому дослідити та порівняти функціональні можливості реалізованих засобів глобальної оптимізації в загальному випадку складно.

У цій роботі досліджується автоматизований спосіб розрахунку ОС, який базується на використанні одного з сучасних алгоритмів глобальної безперервної оптимізації [13, 14]. На прикладах розрахунку нижче буде показано, що такий підхід суттєво полегшує розрахунок, адже спрощує його процедуру та скорочує час на отримання нових чи покращення вже відомих ОС.

### Постановка задачі

*Метою роботи* є експериментальна перевірка дієздатності та ефективності автоматизованого розрахунку ОС зі зменшеною дисторсією засобами глобальної оптимізації.

Для досягнення поставленої мети раніше розроблено відповідне програмне забезпечення. В його алгоритми закладено один з найефективніших методів диференціальної еволюції — метод багатовимірної математичної оптимізації, що належить до класу стохастичних еволюційних алгоритмів оптимізації, в якій використано окремі ідеї генетичних алгоритмів [15—17].

Зокрема, в цій роботі досліджується удосконалений адаптивний метод диференційної еволюції Коші, запропонований нещодавно [15, 16]. Його особливістю є те, що кожна змінна має власні контрольні параметри-показники. Ідея адаптивного методу Коші полягає в тому, що на кожній новій ітерації методу його параметри адаптуються на основі середніх значень показників, отриманих на попередніх ітераціях.

Розроблена комп'ютерна програма з реалізованим у ній вищезазначеним алгоритмом дозволяє в автоматичному режимі визначити конструктивні параметри системи (радіуси кривизни поверхонь, товщини лінз та осьові повітряні проміжки). Для перевірки дієздатності такого підходу в статті здійснено розрахунок ОС двох лінзових об'єктів: класичного ширококутного фотооб'єктива та проекційного об'єктива.

### Методика автоматизованого розрахунку ортоскопічних об'єктів

Перед розв'язанням поставленої задачі спочатку необхідно визначитися з типом системи, кількістю лінз та основними функціональними параметрами ОС (полем зору, типом апертури, відносним отвором тощо).

Далі розробнику потрібно вибрати параметри оптимізації та сформулювати оціночну функцію. Зазвичай, базова функція оптимізації — це функція мінімізації середньоквадратичних розмірів світлових плям всіх заданих пучків в площині зображень або функція мінімізації деформацій хвильового фронту. Ця функція містить складові елементи для контролю діапазонів допустимих значень параметрів та обмежень, необхідних для отримання системи, яку можна фізично реалізувати. Складові елементи оціночної функції генеруються автоматично засобами розробленого програмного забезпечення. Додатково конструктором можуть задаватися бажані або граничні значення

для функціональних та конструктивних параметрів системи, її аберрацій, параметрів довільних променів тощо.

Конструктор має вибрати параметри оптимізації, встановити довільні значення радіусів всіх поверхонь, повітряних проміжків та осьових товщин лінз, а також ввести діапазони на їх допустимі значення. Встановлення регулятора вихідного кута апертурного променя дозволяє забезпечити бажане значення задньої фокусної відстані ОС. У разі потреби є можливість обмежити довжину ОС вздовж осі, задати максимальне значення дисторсії, граничне значення кута головного променя похилого пучка в просторі зображень (для забезпечення телецентричності вихідних пучків) тощо.

Наступний етап є найтривалішим, адже він передбачає автоматичну процедуру глобальної оптимізації за одним із закладених у програму алгоритмів (як вже зазначалося, використано адаптивний метод диференційної еволюції Коші).

Після глобальної оптимізації ОС набуває практично кінцевого вигляду, однак з метою остаточного «доведення» ОС за необхідності можна скористатися локальною оптимізацією.

### Результати автоматизованого розрахунку ортоскопічних об'єктивів

Як перший приклад вибрано ширококутний фотооб'єктив з патенту США 5621575 компанії Fujii Photo Optical Co [18]. Цей об'єктив містить зі сторони об'єкта негативну меніскову першу лінзу, склесний компонент з позитивної другої та негативної третьої лінз, склесний компонент з позитивної четвертої та негативної п'ятої лінз, позитивну шосту лінзу та негативну меніскову сьому лінзу (рис. 2а).

Фотооб'єктив має задню фокусну відстань 100 мм, кутове поле зору в просторі предметів  $77,2^\circ$ , відносний отвір 1:4,08 та призначений для роботи у спектральному діапазоні 0,436...0,656 мкм з основною довжиною хвилі 0,587 мкм. Під час його параметричного синтезу задані додаткові вимоги-обмеження на загальну осьову довжину (від першої поверхні до площини зображень) – 132,8 мм та максимальне допустиме значення дисторсії — 0,26 %.

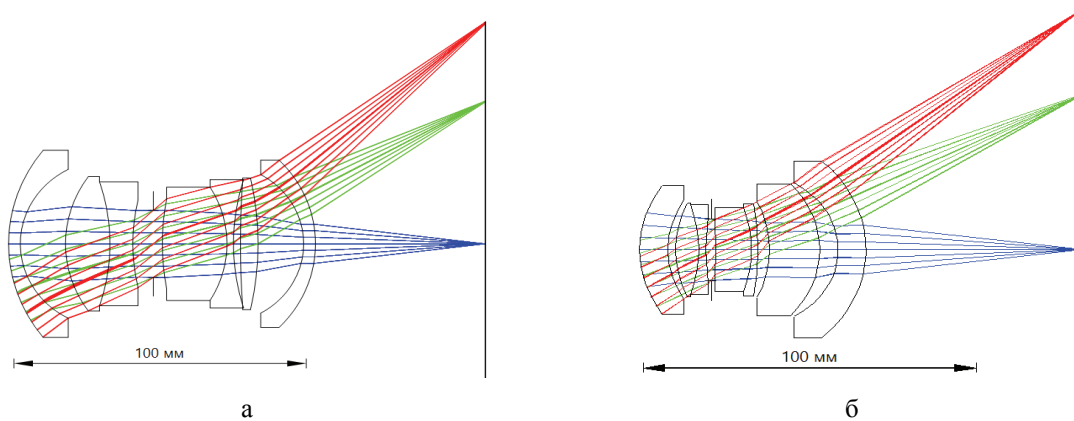


Рис. 2. Оптичні схеми ширококутного фотооб'єктива з ходом променів:

а — варіант з патенту США 5621575 [18]; б — розрахований варіант

На рис. 2б показана оптична схема розробленого ширококутного фотооб'єктива, а в табл. 1 — його конструктивні параметри.

Таблиця 1

Конструктивні параметри розрахованого ширококутного фотооб'єктива

Номер поверхні	Радіус кривизни поверхні, мм	Осьова товщина, мм	Показник заломлення $n_e$ та коефіцієнт дисперсії $v_e$	Світловий діаметр, мм
Предмет	$\infty$	$\infty$	—	—
1	36,448	8,53	1,635; 45,69	42,51
2	30,672	2,34	—	32,69
3	37,113	6,92	1,668; 47,19	30,96
4	-44,522	2	1,686; 35,23	29,6
5	88,756	1,73	—	22,64
б (апертурна діафрагма)	$\infty$	22,64	—	20,3
7	-231,119	10,76	1,805; 47,50	20,1
8	-44,307	2	1,571; 41,75	27,75

Номер поверхні	Радіус кривизни поверхні, мм	Осьова товщина, мм	Показник заломлення $n_e$ та коефіцієнт дисперсії $\nu_e$	Світловий діаметр, мм
9	-90,631	3,43	—	30,46
10	-35,83	15,03	1,805; 47,50	31,79
11	-31,436	5,58	—	43,53
12	-25	8,3	1,805; 24,74	44,22
13	-38,855	65	—	58,34
Зображення	$\infty$	—	—	160,1

В порівнянні з патентним аналогом, аберації розробленої ОС виправлені краще. Так, середньоквадратичний радіус світлової поліхроматичної плями дорівнює 4,6 мкм на осі та 161 мкм на краю поля зору (у патентного аналога — 15 мкм і 289 мкм, відповідно). Дисторсія розрахованого об'єктива у всьому полі зору менша 0,26 %. Середньоквадратична похибка хвильового фронту для основної довжини хвилі та осьового пучка не перевищує 0,067 мкм, а перепад — 0,262 мкм. Графіки модуляційної передавальної функції (МПФ) показано на рис. 3.

За другий приклад вибрано телецентричний проєкційний об'єктив з патенту США 4441792 компанії Canon Kabushiki Kaisha [19]. ОС цього об'єктива містить негативну меніскову першу лінзу, позитивну другу лінзу, негативну третю лінзу, позитивну четверту лінзу та склесений компонент з негативною п'ятою та позитивною шостою лінз (рис. 4а). Об'єктив має задню фокусну відстань 66,3 мм, відносний отвір 1:7,35, лінійне поле зору 508 мм, віддалення площини предметів 1270 мм та розроблений для видимого спектрального діапазону (0,486...0,655 мкм) з основною довжиною хвилі 0,587 мкм.

Параметричний синтез ОС об'єктива проводився з такими обмеженнями: максимальна відстань від першої поверхні лінзи до зображення — 236,3 мм, максимальне допустиме значення дисторсії — 0,5 %, максимальне кутове відхилення головного променя в просторі зображень — 0,05 градусів.

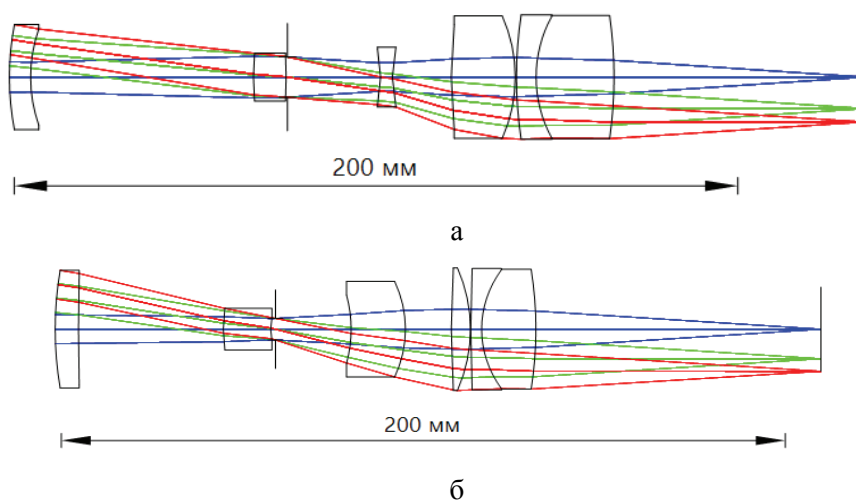


Рис. 4. Оптичні схеми телецентричного проєкційного об'єктива з ходом променів:  
а — варіант з патенту США 4441792 [19]; б — розрахований варіант

На рис. 4б показана оптична схема розробленого об'єктива, а в табл. 2 — його конструктивні параметри. Розроблений варіант є добре виправленим на аберації для заданих довжин хвиль та збалансованим по полю зору. Так, середньоквадратичний радіус світлової поліхроматичної плями становить 2,6 мкм на осі та 4,9 мкм на краю поля зору (у патентного аналога 5,7 мкм і 5,2 мкм, від-

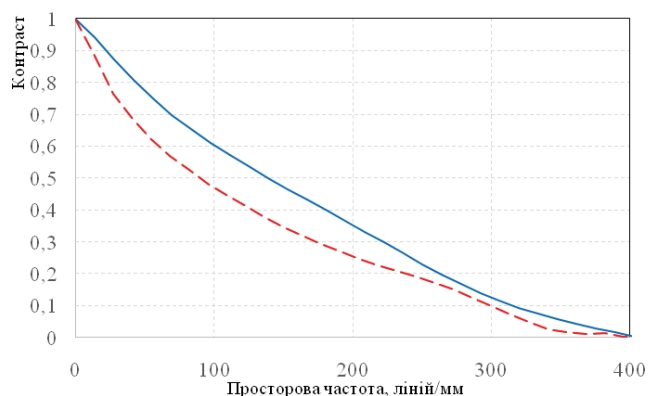


Рис. 3. Графіки МПФ ширококутного фотооб'єктива в дифракційному наближенні для основної довжини хвилі та осьового пучка: — — варіант з патенту США 5621575 [18]; — — розрахований варіант

повідно). Максимальне значення дисторсії розрахованого об'єктива дорівнює 0,5 %. Середньоквадратична похибка хвильового фронту для основної довжини хвилі по всьому полю не перевищує 0,064 мкм, а перепад — 0,26 мкм.

Таблиця 2

Конструктивні параметри розрахованого телецентричного проєкційного об'єктива

Номер поверхні	Радіус кривизни поверхні, мм	Осьова товщина, мм	Марка скла з каталогу SCHOTT	Світловий діаметр, мм
Предмет	$\infty$	$\infty$	—	—
1	110,528	6,45	N-BK10	35
2	696,186	40		33,14
3	42,75	13,1	N-LAK12	12,35
4	16,671	1,32		6,83
5 (апертурна діафрагма)	$\infty$	$\infty$	—	6,42
6	-41,178	15	F5	20,14
7	-35,406	12,7		28,43
8	287,897	5,3	N-SK5	36,15
9	-48,006	0,1	—	36,43
10	423,455	3	SF1	35,39
11	31,296	15	N-BALF4	35,6
12	-121,027	78,76	—	25,03
Зображення	$\infty$	—	—	—

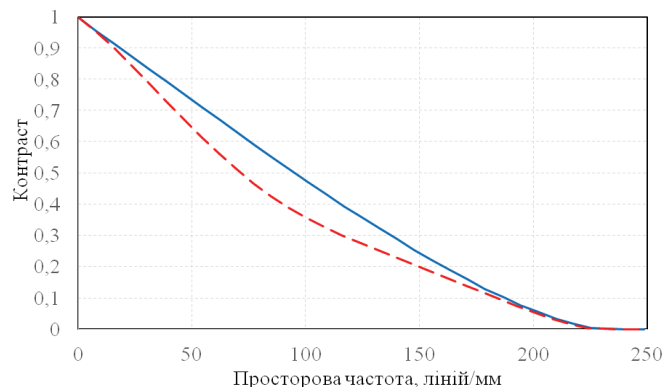


Рис. 5. Графіки МПФ телецентричного проєкційного об'єктива в дифракційному наближенні для основної довжини хвилі та осьового пучка:  
 - - - - - варіант з патенту США 5621575 [18]; — — — — — розрахований варіант

### Висновки

Здійснено експериментальну перевірку дієздатності запропонованого автоматизованого методу розрахунку оптичних систем на прикладі розробки двох оптичних систем лінзових об'єктивів зі зменшеною дисторсією. Отримані результати свідчать, що розраховані системи за якістю зображення не поступаються відомим запатентованим аналогам. Підтверджено, що адаптивний метод диференційної еволюції Коші є потужним засобом, за допомогою якого можна здійснювати параметричний синтез оптичних систем з параметрами, що задовольнятимуть заданим вимогам.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Fischer Robert E. Optical system design. — 2-nd edition / R. E. Fischer, B. Tadic-Galeb, P. Yoder. — SPIE Press. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. — 809 p. — ISBN-10 0071472487; ISBN-13 978-0071472487.
2. Mack Chris A. Field guide to optical lithography / Ch. A. Mack. — SPIE field guides ; FG 06 [Series Editor John E. Gleivenkamp]. — Bellingham, WA 98227-0010, 1978. — 543 p. — ISBN-10 0819462071; ISBN-13 9780819462077.
3. Пат. 6822805 США, G02B 21/02. Objective lens / K. Kurata (США) ; заявитель и патентообладатель Olympus Corporation ; заявл. 18.11.02 ; опубл. 23.11.04. — 28 p.

4. Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration Theory and Correction of Optical Systems. / H. Gross, H. Zügge, M. Peschka, F. Blechinger ; Edited by Herbert Gross. — WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007. — ISBN 978-3-527-40379-0.
5. Заказнов Н. П. Теория оптических систем : учеб. для студ. приборострой. спец. вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. / Н. П. Заказнов, С. И. Кирюшин, В. И. Кузичев. — М. : Машиностроение, 1992. — 447 с. : ил. — ISBN 5-217-01995-6.
6. Пискунов Д. Е. Аналитико-оптимизационный метод абберационного синтеза оптических систем / Д. Е. Пискунов, А. М. Хорохоров // Наука и образование : научное изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2012. — № 7. — С. 153—162. — DOI 10.7463/0712.0442505.
7. Русинов М. М. Композиция оптических систем / М. М. Русинов. — Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. — 383 с. : ил. — ISBN 5-217-00546-7.
8. Ежова К. В. Математическое моделирование фотограмметрической дисторсии // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. — 2006. — Вып. 26. — С. 235—239.
9. CODE V software. [Electronic resource] / CODE V optical design software. — Дата публікації: 2016. — Дата перегляду: 03.01.2017. — Access mode: <https://optics.synopsys.com/codev/>.
10. Zemax software. [Electronic resource] / OpticStudio software. — Дата публікації: 2016. — Дата перегляду: 3.01.2017. — Access mode : <http://www.zemax.com/os/opticstudio>.
11. OSLO software. [Electronic resource] / OSLO optical design software. — Дата публікації: 2016. — Дата перегляду: 03.01.2017. — Access mode : <http://www.lambdare.com/oslo>.
12. OpTaliX software [Electronic resource] / OpTaliX software for optical design, thin-films and illumination. — Дата публікації: 2016. — Дата перегляду: 03.01.2017. — Access mode: <http://www.optenso.de/>.
13. Rangaiah Gade Pandu. Stochastic global optimization. Techniques and applications in chemical engineering. Advances in Process Systems Engineering / G. P. Rangaiah // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.. — 2010. — Vol. 2. — 724 p. — ISBN 978-981-4299-20-6.
14. Talbi El-Ghazali. Metaheuristics: from design to implementation / El-Gh. Talbi. — John Wiley & Sons, Inc., 2009. — 593 p. — ISBN 978-0-470-27858-1.
15. Choi Tae Jong. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm for global numerical optimization / T. J. Choi, C. W. Ahn, J. An. // The Scientific World Journal. — 2013. — Vol. 2013. — Article ID 969734, 12 pages. — DOI 10.1155/2013/969734.
16. Choi Tae Jong. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm with bias strategy adaptation mechanism for global numerical optimization / T. J. Choi, C. W. Ahn. // Journal of Computers. — 2014. — Vol. 9, No 9. — Pp. 2139—2145. — DOI 10.4304/jc.9.9.2139-2145.
17. Haupt Randi L. Practical genetic algorithms. 2-nd edition / R. L. Haupt, S. E. Haupt. — John Wiley & Sons, Inc., 2004. — 253 p. — ISBN 0-471-45565-2.
18. Пат. 5621575 США, G02B 13/04. Wide-angle lens system / N. Toyama (США) ; заявитель и патентообладатель Fujii Photo Optical Co., Ltd. ; заявл. 06.03.96 ; опубл. 15.04.97. — 17 p.
19. Пат. 4441792 США, G02B 13/22. Telecentric projection lenses / M. Tateoka (США) ; заявитель и патентообладатель Canon Cabushoko Kaisha ; заявл. 26.02.81 ; опубл. 10.04.84. — 33 p.

Рекомендована кафедрою біомедичної інженерії ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 25.12.2016.

**Сокуренко Вячеслав Михайлович** — канд. техн. наук, доцент кафедри оптичних та оптико-електронних приладів, e-mail: sokurenko2@meta.ua ;

**Стріха Олександра Євгенівна** — студентка приладобудівного факультету, e-mail: babchenkosahka@mail.ru .  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

**V. M. Sokurenko<sup>1</sup>**  
**O. Ye. Strikha<sup>1</sup>**

## Design of Lenses with Corrected Distortion

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute»

*To accomplish automated design of optical systems with reduced distortion, one of modern global optimization algorithms has been proposed, namely the adaptive Cauchy differential evolution. By using special software, an experimental verification has been carried out to test performance of this approach. It was done on examples of lenses, similar to those that had already been patented. The time interval, required to design an optical system with a total number of unknown variables from 20 to 30, does not exceed a few hours. The results of this research indicate that the above-mentioned algorithm is an effective tool, enabling to perform automated parametric synthesis and determine prescription data of an optical system with corrected distortion and high image quality.*

**Keywords:** distortion, optical system, automated design, global optimization.

*Sokurenko Viacheslav M.* — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Optical and Optoelectronic Devices, e-mail: sokurenko2@meta.ua ;

*Strikha Oleksandra Ye.* — Student of the Department of Instrumentation, e-mail: babchenkosahka@mail.ru

**В. М. Сокурєнко<sup>1</sup>**  
**А. Е. Стриха<sup>1</sup>**

## **Разработка объективов с исправленной дисторсией**

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

*Предложено осуществлять автоматизированный расчет оптических систем объективов с уменьшенной дисторсией при помощи одного из современных алгоритмов глобальной оптимизации, а именно адаптивного метода дифференциальной эволюции Коши. Благодаря использованию специального программного обеспечения в автоматизированном режиме выполнена экспериментальная проверка работоспособности такого подхода на примерах расчета объективов, аналогичных уже запатентованным. Интервал времени, необходимый для разработки оптической системы с количеством поисковых параметров от 20 до 30, не превышает нескольких часов. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что вышеупомянутый алгоритм является эффективным инструментом, позволяющим выполнить автоматизированный параметрический синтез и определить конструктивные параметры оптической системы с исправленной дисторсией и высоким качеством изображения.*

**Ключевые слова:** дисторсия, объектив, оптическая система, автоматизированный расчет, глобальная оптимизация.

*Сокурєнко Вячеслав Михайлович* — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры оптических та оптико-електронних приборів, e-mail: sokurenko2@meta.ua ;

*Стриха Александра Евгеньевна* — студент приборостроительного факультета, e-mail: babchenkosahka@mail.ru