

3. Осевой зазор между световодами в конекторе также приводит к потерям излучения. Для многомодовых световодов при величине потерь  $P(x)=0,2$  дБ этот зазор может составлять  $x=20$  мкм, а для одномодовых световодов при тех же потерях  $x=8$  мкм.

Дальнейшие исследования будут направлены на анализ влияния шероховатостей торцов соединяемых световодов на величину потерь, а также на оценку влияния клиновидности в соединении световодов в конекторе на потери.

#### **Литература**

1. Иванов А. Б. Волоконная оптика, системы передачи, измерения. – М.: Компания Сайрус системс, 1999. – 375 с.
2. Кучеренко О. К. Влияние параметров световодов на длину регенерационного участка волоконно-оптической линии связи / О. К. Кучеренко, Н. И. Свешникова // Вісник НТУУ «КПІ». Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2012. – Вип. 43. – С. 30 – 35.
3. Кабыш С. В. Принимаем ВОЛС в эксплуатацию // Сети и телекоммуникации. – 2003. – № 5. – С. 64 – 69.
4. Кучеренко О. К. Конспект лекцій «Волоконна і інтегральна оптика». – Електронне видання. МОНУ НТУУ «КПІ», НМУ № Е11/12–155. – 2012. – 182 с.

*Надійшла до редакції  
02 червня 2015 року*

© Кучеренко О. К., Кучеренко В. А., 2015

УДК 681.7.067

## **РОЗРОБКА ОПТИЧНИХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ ГЛОБАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ**

*Сокуренько В. М., Макаренко Я. І.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
м. Київ, Україна, Університет Мена, Ле Ман, Франція*

*З використанням спеціального програмного забезпечення в автоматизованому режимі було розроблено оптичні системи окуляра і фотооб'єктива. Якість зображення отриманих систем дозволяє їх використовувати з існуючими матричними приймачами випромінювання. Автоматизований розрахунок здійснювався з застосуванням одного з сучасних алгоритмів глобальної оптимізації, а саме адаптивного методу диференційної еволюції Коші. Результати досліджень свідчать про те, що цей алгоритм виявився потужним інструментом, який дозволяє провести автоматизований параметричний синтез довільної оптичної системи. Інтервал часу, витраченого на розробку оптичної системи з кількістю пошукових параметрів біля 30, не перевищує декількох годин. Ефективність синтезу значною мірою залежить від формування оціночної функції і встановлення раціональних обмежень на конструктивні параметри на стадії введення вихідних даних.*

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

#### **Вступ**

Проблема оптимізації, тобто пошук найкращого розв'язку проблеми, зазвичай виникає під час огляду найрізноманітніших задач. Оскільки комп'ютери на

практиці дозволяють розв'язувати задачі, що є недоступними для аналітичних методів, успіхи обчислювальної математики підштовхнули до прискореної розробки нових та удосконалення існуючих алгоритмів і методів як локальної, так і глобальної оптимізації [1-7].

В роботі буде показано, що використання засобів глобальної оптимізації дозволяє в автоматизованому режимі отримувати якісні оптичні системи (ОС) різноманітного призначення. Тому застосування сучасних методів глобальної оптимізації для задач проектування ОС є перспективним напрямком, адже сприятиме розробці нових ОС або покращенню вже існуючих.

### **Постановка задачі**

Метою роботи є перевірка можливості автоматизованого розрахунку ОС за допомогою адаптивного методу диференційної еволюції Коші, запропонованого у 2013 році [6]. Диференціальна еволюція – це метод багатовимірної математичної оптимізації, що належить до класу стохастичних еволюційних алгоритмів оптимізації та використовує окремі ідеї генетичних алгоритмів. В удосконаленому методі Коші кожна область має свій власний контрольний параметр. Ідея адаптивного методу Коші полягає в тому, що контрольні параметри кожної області адаптуються на основі середнього значення параметра, який успішно еволюціонував від значень індивідуального параметра.

Для проведення досліджень було розроблено відповідне програмне забезпечення розрахунку довільних ОС з вбудованою в нього функцією глобальної оптимізації. У процесі глобальної оптимізації програма має автоматично визначити радіуси кривизни, осьові повітряні проміжки та товщини лінз. Реалізований алгоритм глобальної оптимізації має гарантовано забезпечити дотримання заданих користувачем граничних умов (наприклад, встановленої задньої фокусної відстані та певної максимальної осьової товщини системи). В результаті процедури автоматизованого проектування, яка триватиме, зазвичай, декілька годин, можна сподіватися на отримання оптимізованої ОС з заданими вхідними параметрами та граничними умовами.

В даній роботі проведена перевірка працездатності і ефективності адаптивного методу Коші на прикладі розрахунку двох оптичних схем: окуляра і об'єктива.

### **Вибір існуючих систем окуляра та об'єктива**

Окуляр з віддаленою зіницею представлений в заявці на патент РФ 2003/2212700 ВАТ "Красногорський завод ім. С. А. Зверєва" [8]. Окуляр містить три компоненти, перший з яких – меніск, обернений увігнутою стороною до предмета, другий – склеєний дублет, що складається з двоопуклої лінзи і негативного меніска, оберненого увігнутою стороною до предмета, а третій – двоопукла лінза.

Оптична схема окуляра представлена на рис. 1. Світло від предмета, розташованого на кінцевій відстані від першого компонента, проходить, заломлюю-

чись, через лінзи 1, 2, 3, 4 окуляра і формує в нескінченно віддаленій площині зображення. При розташуванні ока у вихідній зіниці проглядається все поле з найменшим віньєтуванням. Відповідно до запропонованого технічного рішення розрахований варіант окуляра з віддаленою зіницею для фокусної відстані  $f = 100$  міліметрів. Авторам патенту вдалося досягти досить хороших абераційних характеристик.

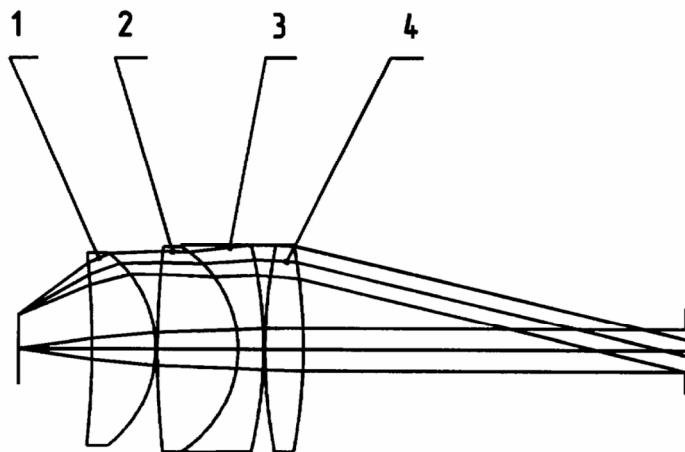


Рис. 1. Хід променів в окулярі ВАТ "Красногорський завод ім. С.А.Зверєва" [8]

Таблиця 1. Числові значення аберацій окуляра з патенту [8]

Тип аберації	Значення аберації
Значення СКВ в широкому спектральному діапазоні:	
для поля №1 (на оптичній осі)	12,3 мкм
для поля №2 (в зоні 0,7)	93,3 мкм
для поля №3 (на периферії, під кутом 27°)	184,9 мкм
Дисторсія на краю поля зору $W=27^\circ$	0,8 %

Як приклад об'єктива було обрано ОС з патенту РФ 2005/2262726 С1 ВАТ "Пеленг" (ВУ) [9]. Представлений в патенті об'єктив містить сім компонентів, перший з яких виконаний як одиночна двоопуклу лінза; другий – як позитивний меніск, направлений увігнутою поверхнею до простору зображень і склеєний з плосковипуклою та плосковогнутою лінзами; третій компонент містить негативний меніск, направлений увігнутою поверхнею до простору предметів; четвертий компонент містить двоопуклу лінзу; п'ятий компонент виконаний як дво-ввігнута лінза, шостий компонент – як одиночна двоопукла лінза. Після шостого компонента введений сьомий компонент, який містить одиночний меніск, звернений увігнутою поверхнею до простору зображень та виконаний зі скла з показником заломлення не більше 1,48. Відстань між третім і четвертим компонентами становить не менше 0,08 фокусної відстані об'єктива, а відстань між шостим і сьомим компонентами становить не менше 0,36 фокусної відстані об'єктива. Забезпечується збільшення поля зору, а також підвищення якості зо

браження в широкому спектральному діапазоні об'єктива (540... 900 нм) внаслідок збільшення коефіцієнтів передачі модуляції по всьому полю зору.

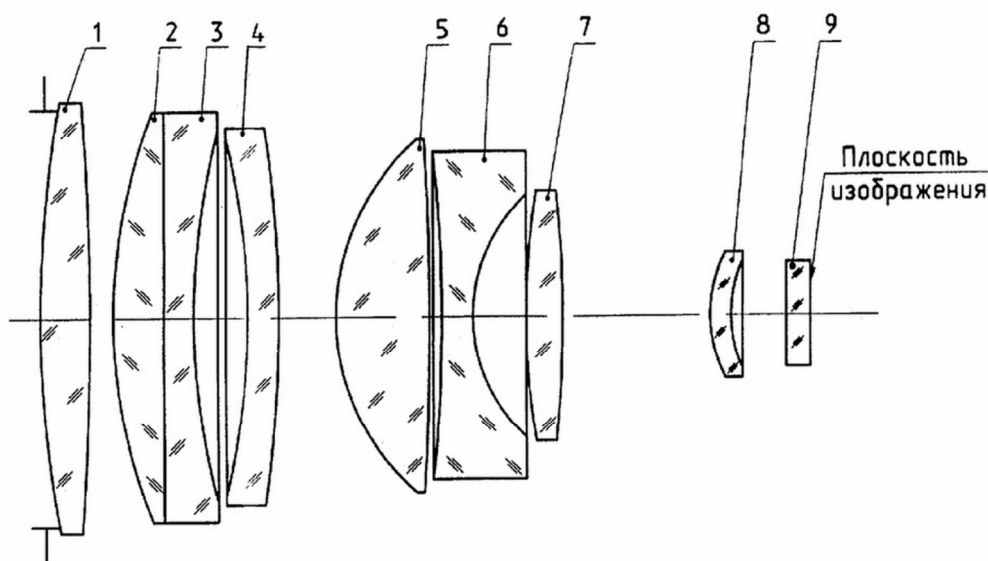


Рис. 2. Оптична схема об'єктива ВАТ Пеленг» [9]

Таблиця 2. Числові значення аберацій об'єктива з патенту [9]

Тип аберації	Значення аберації
Значення СКВ в широкому спектральному діапазоні:	
для поля №1 (на оптичній осі)	16,3 мкм
для поля №2 (в зоні 0,7)	19,3 мкм
для поля №3 (на периферії, під кутом 8°)	22,3 мкм
Дисторсія на краю поля зору $W=8^\circ$	0,08 %

### Загальна послідовність автоматизованого розрахунку

Загальний підхід до розв'язання поставленої задачі розрахунку можна пояснити схемою, представленою на рис. 3.

Для початку процесу оптимізації необхідно ввести в програму основні стандартні входні дані, а саме загальну структуру оптичної системи (радіуси лінз, матеріали лінз, що вибираються з обраних каталогів, повітряні проміжки, товщини лінз, фокусну відстань, відносний отвір тощо).

На другому етапі відбувається формування оптимізаційної моделі, тобто вибір оператором параметрів оптимізації. Конструктор має встановити діапазони на кривизни поверхонь лінз, повітряні проміжки, осьові товщини лінз, допустимі товщини лінз на краю з урахуванням мінімальних допусків для подальшого закріплення, бажане значення фокусної відстані та максимальну осьову товщину ОС (у разі потреби) та обрати оціночну функцію. Критерієм якості ОС може слугувати, наприклад, функція мінімізація середньоквадратичного радіусу плям розсіювання з можливим заданням ваги для певних точок поля зору та довжин хвиль.

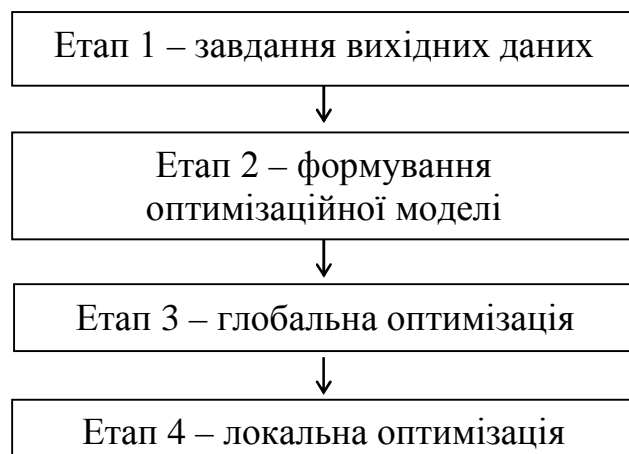


Рис. 3. Загальна послідовність процедури автоматизованого розрахунку ОС

Наступний (третій) етап є найтривалішим, але й найпростішим для користувача, бо передбачає автоматичну процедуру глобальної оптимізації за одним із закладених у програму алгоритмів (в даній роботі це є адаптивний метод диференційної еволюції Коші).

Після проведення глобальної оптимізації, ОС набуває своєї майже остаточної форми. Для кінцевого «тонкого доведення» ОС можна використати локальну оптимізацію, наприклад, поширеним в оптиці демпфованим методом найменших квадратів.

### Результати автоматизованого розрахунку

Для параметричного синтезу ОС окуляра було задано такі вхідні параметри:

- спектральний діапазон: 0,48...0,65 мкм;
- основна довжина хвилі: 0,55 мкм;
- точки кутові поля зору в просторі предметів: 0°; 19°; 27°;
- марок скла: вітчизняні;
- максимальна довжина системи: 452 мм;
- діаметр апертурної діафрагми: 3 мм;
- задня фокусна відстань: 100 мм;
- діафрагмове число:  $f/3,5$ .

Як вже зазначалося, за основний алгоритм глобальної оптимізації було обрано адаптивний метод диференційної еволюції Коші. Розмір популяції на кожну зміну встановлено рівним 20. Загальна кількість пошукових параметрів становила 33.

Оптична схема отриманого окуляра представлена на рис. 4, а його конструктивні параметри – в табл. 3.

Для оцінки якості зображення на рис. 5 представлені отримані точкові діаграми в широкому спектральному діапазоні для трьох точок поля зору. Дисторсія розрахованого окуляра не перевищує 0,8%.

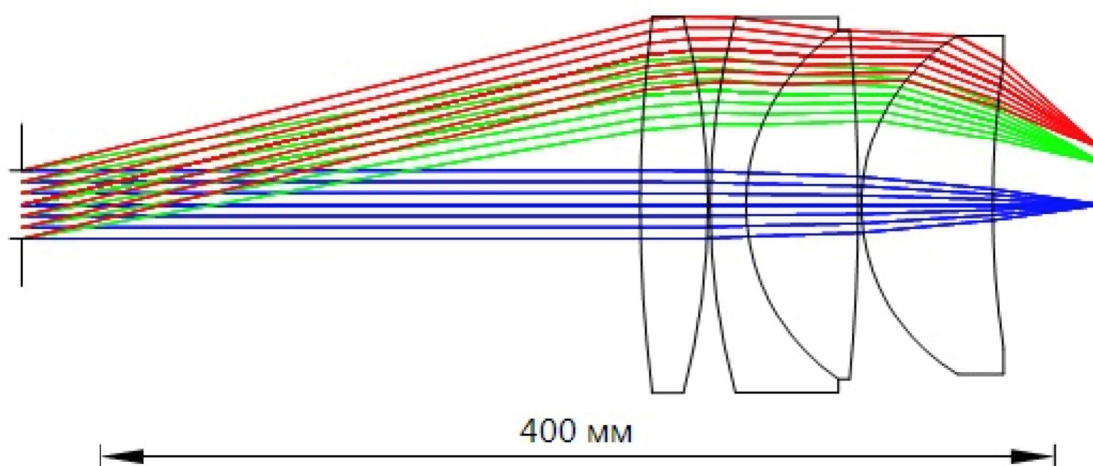


Рис. 4. Хід променів отриманої ОС окуляра

Таблиця 3. Конструктивні параметри розробленої системи окуляра

Номер поверхні	Радіус, мм	Товщина, мм	Марка скла	Світлова висота, мм
1 (апертурна діафрагма)	$\infty$	259		14,29
2	614,969	28,342	ТК17	77,65
3	-307,192	0,9999		78,87
4	297,411	14,999	ТФ10	78,59
5	88,330	47,001	ТК17	73,09
6	-738,749	1,302		73,10
7	82,728	55	ТК17	70,96
8	399,809	45,355		60,49
Зображення	$\infty$	0		23,72

Для параметричного синтезу ОС об'єктива було задано такі вхідні параметри:

- спектральний діапазон: 0,54...0,9 мкм;
- основна довжина хвилі: 0,65 мкм;
- точки кутового поля зору в просторі предметів: 0°; 5,6°; 8°;
- марки скла: задані конструктором;
- максимальна довжина системи: 216 мм;
- діаметр апертурної діафрагми: 100 мм;
- задня фокусна відстань: 174 мм;
- діафрагмове число:  $f / 1,7$ .

Оптична схема розробленого об'єктива представлена на рис. 6, а його конструктивні параметри – в табл. 4.

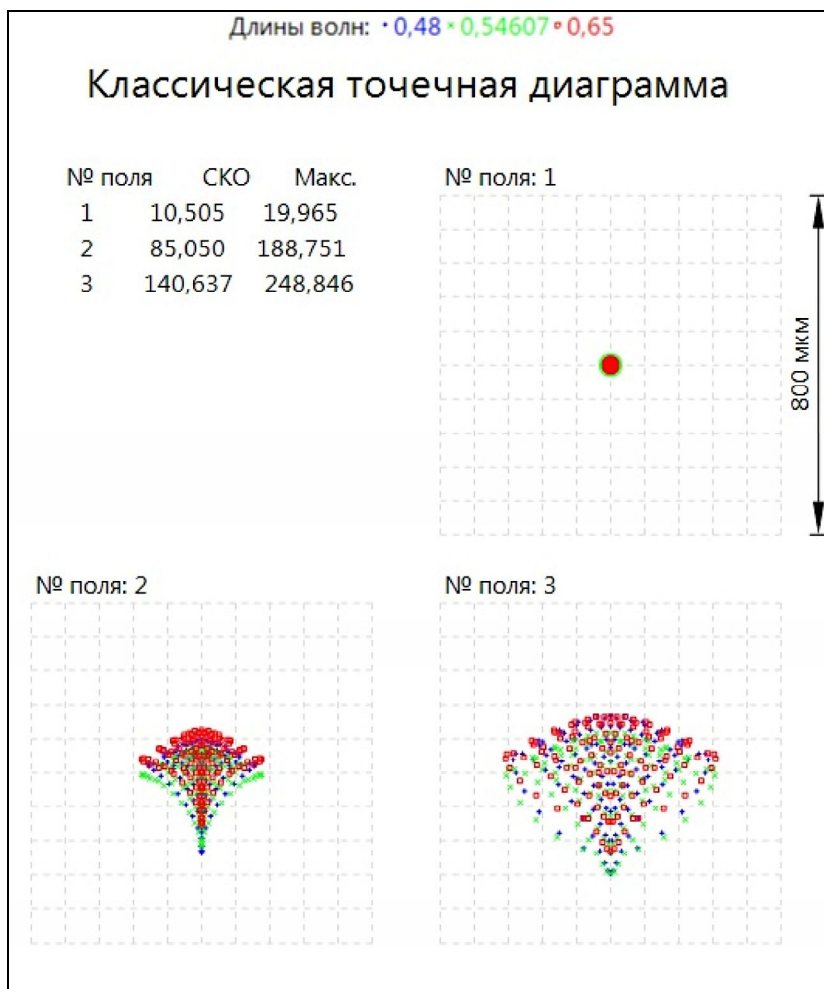


Рис. 5. Точкові діаграми розробленої ОС окуляра в широкому спектральному діапазоні (поле № 1 – на оптичній осі; поле № 2 – в зоні 0,7; поле № 3 – на периферії, під кутом  $27^\circ$ )

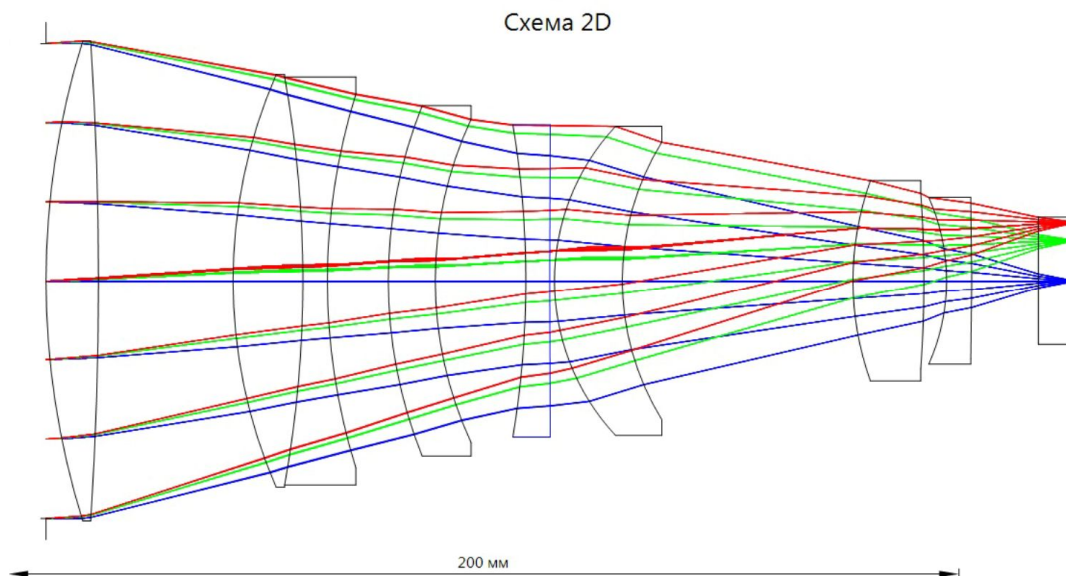


Рис. 6. Хід променів отриманої ОС об'єктива



Таблиця 4. Конструктивні параметри розробленої ОС об'єктива

Номер поверхні	Радіус, мм	Товщина, мм	Показник заломлення $n_c$ та коефіцієнт дисперсії $v$	Світлова висота, мм
1(апертурна діафрагма)	$\infty$	0		50
2	168,833	11,041	1,660; 50,81	50,54
3	-781,479	28,322		50,41
4	108,628	14,695	1,660; 50,81	43,46
5	-242,057	5,138	1,813; 25,16	42,97
6	132,060	12,822		39,41
7	99,142	9,886	1,813; 25,16	36,91
8	80,720	19,063		34,08
9	-199,227	5,009	1,660; 50,81	32,91
10	3555,614	1,017		32,81
11	47,715	14,277	1,654; 43,23	32,59
12	55,750	48,522		29,26
13	62,670	14,938	1,660; 50,81	21,16
14	-260,941	4,772		18,49
15	-43,328	5,290	1,489; 70,23	17,63
16	-718,418	14,022		16,46
17	$\infty$	7,6	1,519; 63,96	13,46
18	$\infty$	0,077		12,42
Зобр.	$\infty$	0		12,40

Для оцінки якості зображення на рис. 7 представлені точкові діаграми системи, отримані в широкому спектральному діапазоні для п'яти довжин хвиль та трьох точок поля зору. Як видно з рис. 7, розроблена ОС виправлена для крайніх довжин хвиль, є збалансованою по всьому полю. Дисторсія розрахованого об'єктива не перевищує 0,08%.

### Висновки

1. За допомогою спеціального програмного забезпечення в автоматизованому режимі було проведено розробку двох розповсюджених типів оптичних систем: окуляра та об'єктива. Абераційні параметри та характеристики отриманих систем цілком відповідають відомим запатентованим аналогам та дозволяють використовувати розроблені системи з існуючими матричними приймачами випромінювання.
2. Результати проведених чисельних досліджень працездатності адаптивного методу диференційної еволюції Коші підтвердили, що цей алгоритм глобальної оптимізації є потужним і ефективним засобом, який дозволяє здійснити автоматизований параметричний синтез оптичних систем. Час, витрачений



на проектування довільної системи «середньої» складності, є прийнятним, оскільки не перевищує декількох годин.

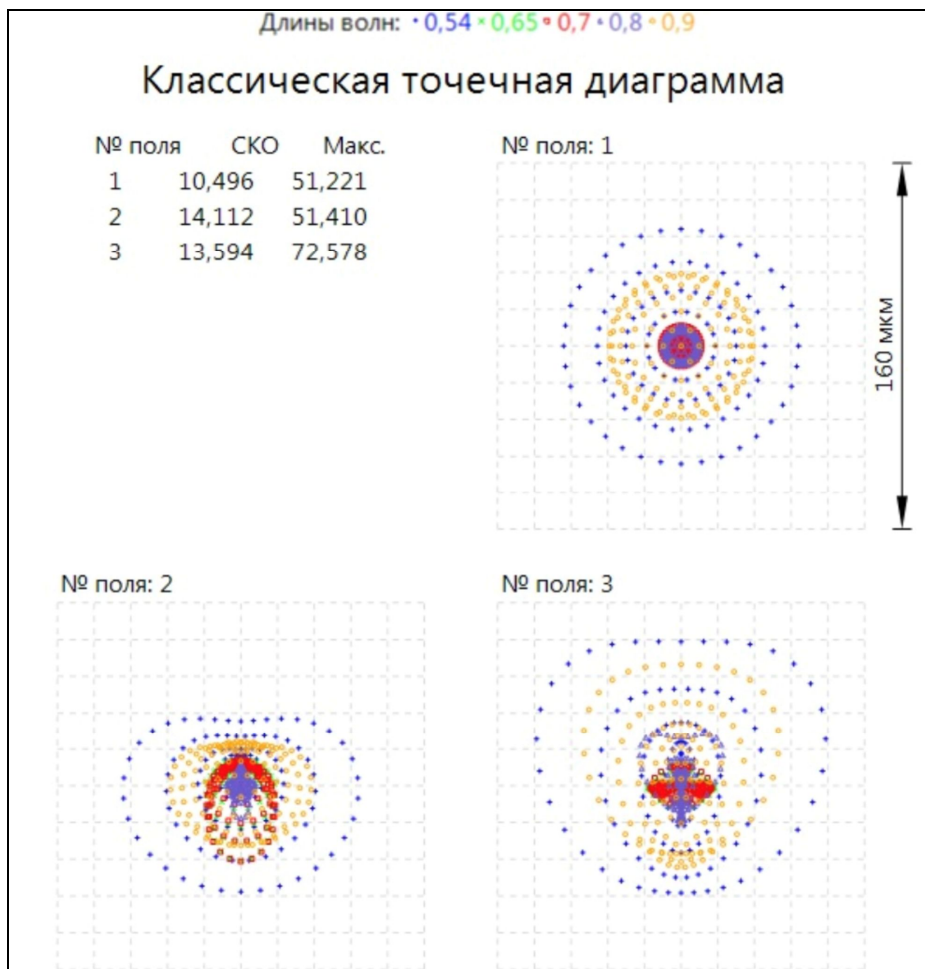


Рис. 7. Точкові діаграми отриманої ОС об'єктива в широкому спектральному діапазоні (поле № 1 – на оптичній осі; поле № 2 – в зоні 0,7; поле № 3 – на периферії, під кутом 8°)

- Ефективність синтезу значною мірою залежить від формування оціночної функції та встановлення прийнятних конструктивних обмежень на стадії введення вихідних даних.
- Подальші зусилля доцільно направити на пошук та застосування удосконалених методів глобальної оптимізації, адже такі методи на практиці доводять свою дієздатність та ефективність під час розрахунку нових оптичних систем.

#### **Література**

- Пантелеев А. В. Метаэвристические алгоритмы поиска глобального экстремума. – М.: MAI-PRINT, 2009. – 160 с.
- Haupt R. and Haupt S. Practical Genetic Algorithms. – 2004. – 253 p.
- 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.

4. Feoktistov V. Differential Evolution In Search of Solutions. Series: Springer Optimization and Its Applications, Vol. 5, 2006. – 195 p.
5. Kumar P., Pant M., and Singh V. P. Two Self-Adaptive Variants of Differential Evolution Algorithm for Global Optimization. International Journal of Applied Mathematics and Mechacnics, Vol. 8, No. 3, 2012. – pp. 22-34.
6. Choi T. J., Ahn C. W., An J. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm for global numerical optimization. The Sc ientific World Journal, Vol. 2013, Article ID 969734, 2013. – <http://dx.doi.org/10.1155/2013/969734>.
7. Choi T. J., Ahn C. W. An Adaptive Cauchy Differential Evolution Algorithm with Bias Strategy Adaptation Mechanism for Global Numerical Optimization, Journal of Computers, Vol 9, No 9, 2014. – pp. 2139-2145.
8. Патент РФ 2212700. Окуляр с удаленным зрачком. МПК G 02 В 25/00. Гоев А.И., Скляр С. Н., Заварзин В. И., Шмыга В. В. Заявл. 07.02.2002. Опубл. 20.19.2003.
9. Патент РФ 2262726. Объектив. МПК G 02 В 9/64, 11/34. Кунделева Н. Е., Козловский С. М., Покрышкин В. И., Ходосевич В. М., Черняк Н. А. Заявл. 17.06.2004. Опубл. 20.10.2005.

*Надійшла до редакції  
28 квітня 2015 року*

© Сокурєнко В. М., Макаренко Я. І., 2015