НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний
(повна назва інституту/факультету)

Комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем
(повна назва кафедри)

УДК 681.7.520

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Н. І. Бурау
(підпис) (ініціали, прізвище)
"_"_____2022 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і назва спеціальності)

на тему: Автоматизоване проєктування оптичних систем телеоб'єктивів

Виконав: студент 2 курсу магістр., групи ПО-11 мп
(шифр групи)

Хуторовий Іван Тарасович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н. Сокуренко В. М. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант Стартап д.е.н., проф, Бояринова К. О. _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, , прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент доцент, к.т.н. Терещенко М.Ф. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2022 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології

Освітньо-професійна програма - Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«___»_____20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студента

Хуторового Івана Тарасовича

1. Тема дисертації «Автоматизоване проєктування оптичних систем телеоб’єктивів», науковий керівник дисертації доцент, к.т.н. Сокуренко В. М. затверджені наказом по університету від «___»_____ 20__ р. №_____

2. Термін подання студентом дисертації «06» грудня 2022 р.

3. Об’єкт дослідження: об’єктиви з фіксованою фокусною відстанню та процес проєктування їх оптичних систем.

4. Предмет дослідження: метод автоматизованого параметричного синтезу оптичних систем телеоб’єктивів.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Проаналізувати сучасні відомі методи локальної та глобальної оптимізації.

Обрати ефективний метод для подальшого застосування у процесі параметричного синтезу оптичних систем телеоб’єктивів з фіксованими фокусними відстаннями.

5.2. Дослідити дієздатність сучасних методів автоматизованого проєктування оптичних систем та обрати найдієвіший для подальшого застосування.

5.3. Здійснити експериментальну перевірку запропонованого методу шляхом автоматизованого параметричного синтезу конкретних оптичних систем телеоб’єктивів.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: презентація.

7. Орієнтовний перелік публікацій

7.1. Хуторовий І. Т., Сокуренко В. М. Автоматизований синтез 12-лінзового телеоб'єктива // Збірник праць XV всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування» – Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 14-15 червня. – 2022. – с. 74-77
7.2. Сокуренко В. М., Хуторовий І. Т., Сокуренко О. М. Розроблення оптичних систем 16-лінзових ортоскопічних телеоб'єктивів // Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки. – Хмельницький, 2022. – Прийнято редакцією до друку в листопаді 2022 р.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Стартап	д.е.н., проф, Бояринова К.О		

9. Дата видачі завдання 13 вересня 2022

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Провести огляд сучасних існуючих телеоб’єктивів	21.09.2022	
2	Провести аналіз сучасних відомих методів локальної оптимізації	28.09.2022	
3	Здійснити аналіз сучасних відомих методів локальної оптимізації	05.10.2022	
4	Дослідити дієздатність сучасних	12.10.2022	

	методів автоматизованого проєктування оптичних систем		
5	Експериментальна перевірка	26.10.2022	
6	Аналіз отриманих результатів	10.11.2022	
7	Стартап	17.11.2022	
8	Оформлення рукопису	04.12.2022	

Студент _____ І. Т. ХУТОРОВИЙ

(підпис) (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації _____ В. М. СОКУРЕНКО

(підпис) (ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Автоматизоване проєктування оптичних систем телеоб'єктивів

Актуальність теми. Через свої унікальні властивості наближення віддалених об'єктів телеоб'єктиви знайшли широке застосування в різних галузях техніки, насамперед в фото- і відеоапаратурі, геодезії, військовій техніці тощо.

Сучасні методи проєктування оптичних систем телеоб’єктивів базуються на оптимізації готових оптичних систем або на застосуванні теорії аберацій третього та п’ятого порядків. Недоліком першого метода є необхідність застосування порівняно якісних оптичних систем, які мають досить якісне зображення. Недоліком другого метода є його обмеженість.

Саме тому розробка телеоб’єктивів ефективним та простим методом на сьогодні набуває свою актуальність.

Мета дослідження: доведення можливості автоматизованого параметричного синтезу оптичних систем телеоб’єктивів.

Завдання дослідження: 1. Розглянути сучасні відомі методи локальної та глобальної оптимізації. Обрати найбільш найефективніший метод для подальшого застосування у процесі параметричного синтезу оптичної системи телеоб’єктива.

2. Дізнатись ефективність сучасних методів автоматизованого проєктування оптичних систем та обрати найбільш практичний для подальшого застосування.

3. Здійснити експериментальну перевірку запропонованого метода шляхом автоматизованого параметричного синтезу конкретних оптичних систем телеоб’єктивів.

Об'єкт дослідження: телеоб’єктиви та процес проєктування їх оптичних систем.

Предмет дослідження: метод автоматизованого параметричного синтезу оптичних систем телеоб’єктивів.

Публікації: за матеріалами магістерської дисертації було опубліковано одну статтю у збірнику праць науково-практичної конференції та прийнято до друку одну статтю у фаховому журналі:

1. Хуторовий І. Т., Сокуренко В. М. Автоматизований синтез 12-лінзового телеоб'єктива // Збірник праць XV всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування» – Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 14-15 червня. – 2022. – с. 74-77

2. Сокуренко В. М., Хуторовий І. Т., Сокуренко О. М. Розроблення оптичних систем 16-лінзових ортоскопічних телеоб'єктивів // Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки. – Хмельницький, 2022. – Прийнято редакцією до друку в листопаді 2022 р.

Ключові слова: оптична система, телеоб’єктив, об’єктив, глобальна оптимізація, диференційна еволюція, адаптивна диференційна еволюція Коші, автоматизований розрахунок, параметричний синтез.

ABSTRACT

Automated design of optical systems of telephoto lenses

Topic relevance. Due to their unique properties of approaching distant objects, telephoto lenses have found wide application in various fields of technology, primarily in photo and video equipment, geodesy, military equipment, etc.

Modern methods of designing optical systems of telephoto lenses are based on the optimization of ready-made optical systems or on the application of the theory of aberrations of the third and fifth orders. The disadvantage of the first method is the need to use relatively high-quality optical systems that have a sufficiently high-quality image. The disadvantage of the second method is its limitation.

That is why the development of telephoto lenses by an effective and simple method is gaining relevance today.

Research goal: proving the possibility of automated parametric synthesis of the optical system of a telephoto lens.

Research objective:

1. Consider modern known methods of local and global optimization. Choose the most effective method for further application in the process of parametric synthesis of the optical system of the telephoto lens.

2. Learn the effectiveness of modern methods of automated design of optical systems and choose the most practical one for further use.

3. To carry out experimental verification of the proposed method by automated parametric synthesis of specific optical systems of telephoto lenses.

Object of research: telephoto lenses and the process of designing their optical systems.

Subject of research: method of automated parametric synthesis of the optical system of telephoto lenses.

Keywords: optical system, telephoto lens, lens, global optimization, differential evolution, adaptive Cauchy differential evolution, automated calculation, parametric synthesis.

ЗМІСТ

ВСТУП..... 12
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ..... 13
1.1. Об’єктиви в оптичних системах.....**Error! Bookmark not defined.**3
1.2. Телеоб'єктиви..... **Error! Bookmark not defined.**4
1.3. Складові елементи та будова телеоб'єктивів.**Error! Bookmark not defined.**5
1.4. Діафрагмове число телеоб'єктивів..... **Error! Bookmark not defined.**7
1.5. Фокусна відстань об'єктивів.....19
1.6. Комерційні зразки телеоб’єктивів..... 19
Висновки до розділу 1..... **Error! Bookmark not defined.**5
РОЗДІЛ 2 ОПТИМІЗАЦІЯ. АНАЛІЗ ЗАПРОПОНОВАНИХ ПІДХОДІВ РОЗРАХУНКУ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ.....156
2.1. Постановка задачі.....**Error! Bookmark not defined.**6
2.2. Методи локальної оптимізації.....306
2.2.1. Методи нульового порядку (методи прямого пошуку)..... 347
2.2.2. Методи першого порядку (градієнтні методи)..... 31
2.2.3. Методи другого порядку.....382
2.3. Методи глобальної оптимізації 385
2.3.1. Алгоритм імітаційного відпалу.....**Error! Bookmark not defined.**7
2.3.2. Грубий випадковий пошук (метод Монте-Карло)..**Error! Bookmark not defined.**8
2.3.3. Метод диференційної еволюції.....40
2.3.4. Оптимізація колективним інтелектом.....42
Висновки до розділу 2..... **Error! Bookmark not defined.**3
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДУ.....295
3.1. Постановка задачі.....**Error! Bookmark not defined.**5
3.2. Запропонований підхід.....**Error! Bookmark not defined.**5
3.3. Алгоритм автоматизованого розрахунку.....50

3.4. Приклад розрахунку..... 51
3.4.1. Автоматизований синтез 12-лінзового телеоб’єктива..... 51
3.4.2. Параметричний синтез серії 16-лінзових ортоскопічних телеоб’єктивів 55
Висновки до розділу 3..... 60
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП–ПРОЄКТУ..... 62
4.1. Опис ідеї проєкту..... 62
4.2 Технологічний аудит ідеї проєкту..... 64
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проєкту..... 66
4.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту..... 75
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту..... 76
Висновки до розділу 4..... 81
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... 82
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 83

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, 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 повно-кадрових 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 доводиться окремі лінзи проєктувати із коштовних марок скла та кристалів, що мають особливі дисперсійні властивості, або ж застосовувати в оптичній системі складні асферичні поверхні високих порядків, виробництво та контроль яких вимагає суттєвих затрат.

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

В даній роботі експериментально досліджено можливість генерування виправлених на дисторсію багатолінзових оптичних систем телеоб’єктивів з

фіксованою фокусною відстанню та високою якістю зображення.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Об’єктиви в оптичних системах

Об’єктив — це одна з частин бінокля, мікроскопа, фотоапарата, чи іншої оптичної системи(ОС) для формування зображень, що спрямована прямо до об’єкта , якого потрібно зобразити чи переглянути. Цілий об’єктив зазвичай складається з поєднування лінз або ж дзеркал , які призначені для отримання якомога більшого ідеального зображення [1].

Об'єктиви камер (ще їх можуть називати "фотографічними об'єктивами", а не по-простому "об'єктивами") мають охоплювати досить велику фокальну площину, саме через це вони складаються з певного ряду елементів оптичних лінз для того, щоб коректувати оптичні аберації. У проєкторах зображень (наприклад відео або фільми, діапроєктори) застосовуються об’єктивні об’єктиви, які змінюють функціонал об’єктива камери, об’єктиви призначені саме для того щоб покривати велику площину зображень та проєктувати його на відстані на геть іншу поверхню [2,3].

Всередині самого телескопа, об'єктивом виступає лінза, що знаходиться на передньому кінці заломлюючого телескопа (наприклад, телескопічних прицілів або звичайного бінокля) або ж первинне дзеркало, що відповідно створює зображення, катадіоптричного або відбиваючого телескопа. Кутова роздільна здатність, а також потужність збору світла телескопа без-принципово пов'язані з діаметром (апертура) об'єктива або ж дзеркала об'єктива. Якщо більша ціль, то і більш тьмяніший об'єкт спостереження вона може переглядати і ще більше деталей вона може розрізнити [2,3].

1.2.Телеоб’єктиви

Телеоб'єктив — це фотографічний об'єктив, який має достатньо велику фокусну відстань при малому задньому відрізку. Така типова конструкція об'єктиву дає можливість отримувати зображення у більшому масштабі, ніж об'єктивом, призначеним для даного формату [4].

Телеоб'єктивом називають оптичну систему, фокусна відстань якої перевищує 70 мм. Втім, до «еталонної» довго-фокусної оптики сьогодні дозволено відносити об'єктиви, якщо фокусна відстань таких не перевищує 135 мм, що має пряме відношення до куту зору на широкій стороні кадру не більше 15 градусів. Телеоб'єктиви відрізняються тим, що їхня будова, а саме оптична система дає змогу суттєво збільшити фокусну відстань при обмеженій довжині [5].

Діапазон фокусних відстаней, які вважаються «телефото», є дуже великим, як видно на наведеній нижче рис. 1.1. Чим більша фокусна відстань об’єктива, тим ільша його здатність заповнювати кадр зображеннями об’єктів з більшої відстані.

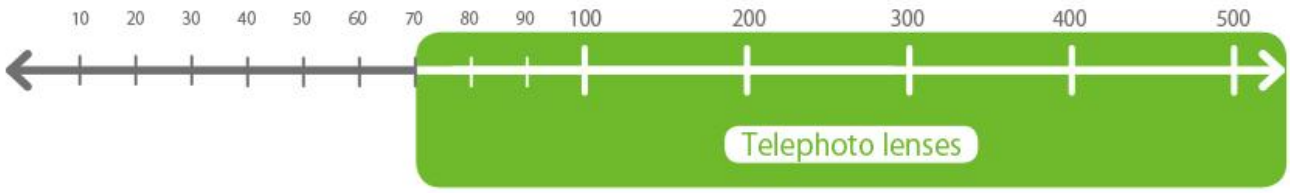


Рис. 1.1 – Фокусні відстані телеоб’єктивів

Телеоб’єктиви, як правило, можна розділити на три підтипи на основі фокусної відстані, еквівалентної 35-міліметровій плівці:

-Середні телеоб’єктиви: приблизно від 85 мм до 100 мм або навіть 135 мм.

-Звичайні телеоб’єктиви: від 200 мм до 300 мм.

-Супер телеоб’єктиви: 400 мм і вище.

1.3.Складові елементи та будова телеоб’єктивів

На відміну від об’єктивів з короткою фокусною відстанню, об’єктиви з довшою фокусною відстанню не мають проблем із утриманням фокусування на нескінченість на SLR [6]. Проте вони «страждають» від занадто великої фокусної відстані. Для простого 300-міліметрового об’єктива детектор повинен розташовуватися на відстані 300 мм позаду задньої головної площини у нескінченному фокусі та навіть далі для ближчого фокусування. Такі обставити є неприйнятними для спостерігача (схема на рис. 1.1).

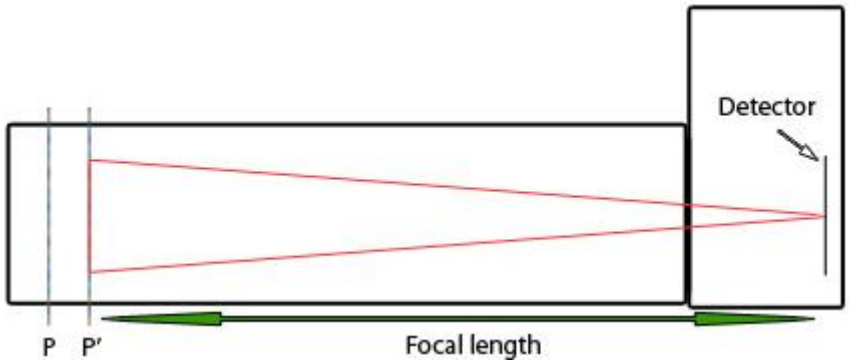


Рис. 1.1 - схема об’єктива з довгою фокусною відстанню.

Конструкція телеоб’єктива дозволяє зробити об’єктив значно компактнішим за рахунок переміщення головних площин перед об’єктивом. Це досягається протилежним чином, ніж короткофокусні лінзи. Телеоб’єктиви мають позитивні лінзи в передній частині об’єктива та негативні лінзи в задній частині об’єктива. Короткофокусні об’єктиви іноді називають зворотними телеоб’єктивами через схожу, але протилежну конструкцію (див. рис. 1.2).

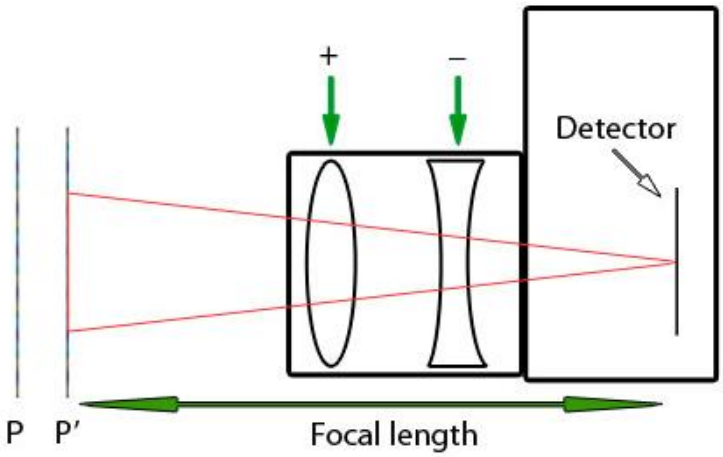


Рис. 1.2 Схема телеоб’єктива

Оскільки головні площини розташовані перед об’єктивом, телеоб’єктиви матимуть додаткову робочу відстань порівняно з їх фокусною відстанню [7]. Їх мінімальна робоча відстань буде їх фокусною відстанню плюс відстань від передньої головної площини до передньої частини лінзи. Схема на рис. 1.3

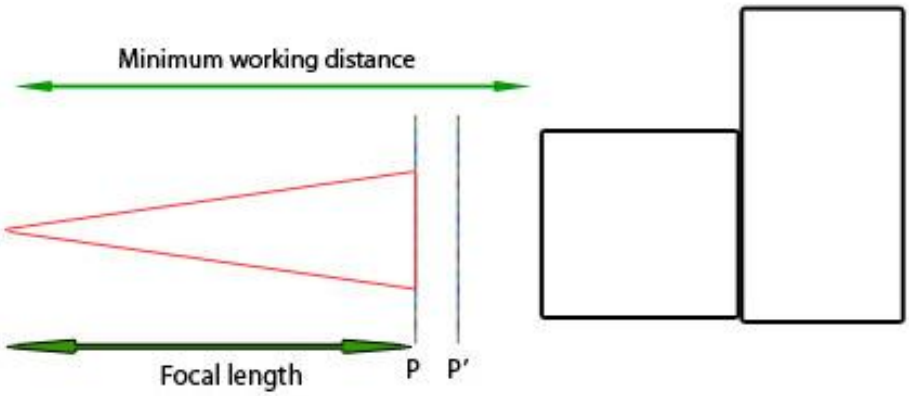


Рис. 1.3 Схема додаткової робочої відстані

1.4. Діафрагмове число телеоб'єктивів

Діафрагма об’єктива (f/number) – це спосіб стандартизувати функції різних об’єктивів. Діафрагма об’єктива допомагає визначити необхідну експозицію, глибину різкості та потенційну максимальну роздільну здатність об’єктива. Усі ці фактори безпосередньо пов’язані зі зіницями лінзи та фокусною відстанню.

Діафрагма об’єктива — це фокусна відстань, поділена на розмір вхідної зіниці. об’єктив 200 мм має вхідну зіницю діаметром 50 мм. що робить об’єктив максимально f/4. Об’єктив 100 мм f/4 матиме вхідну зіницю діаметром 25 мм [8].

f/число = f/E (f = фокусна відстань, E = діаметр вхідної зіниці)

Діафрагмове число об’єктива застосовне лише при фокусуванні на нескінченність. Дві лінзи f/4 пропускатимуть приблизно однакову кількість світла на детектор за однакової витримки, незалежно від фокусної відстані. Вони не завжди будуть еквівалентними, оскільки дві лінзи матимуть різну кількість втрат світла під час проходження світла через лінзу. Втрата світла в лінзі залежить від кількості елементів і різних покриттів лінзи в кожній лінзі.

У нескінченному фокусі детектор буде на одній фокусній відстані від задньої головної площини лінзи. Лінза 200 мм буде вдвічі далі, ніж лінза 100 мм, але вхідна зіниця пропорційно більша. Це призведе до того, що діафрагма для двох лінз матиме однаковий розмір відносно детектора. Кут, який утворюють краї отвору з детектором, буде однаковим (див рис. 1.4).

У фокусі нескінченності об’єктив f/4 на вхідній зіниці також матиме діафрагму f/4 на вихідній зіниці. Це не буде вірно для ближчого фокусування. Це питання буде розглянуто окремо в наступній частині.

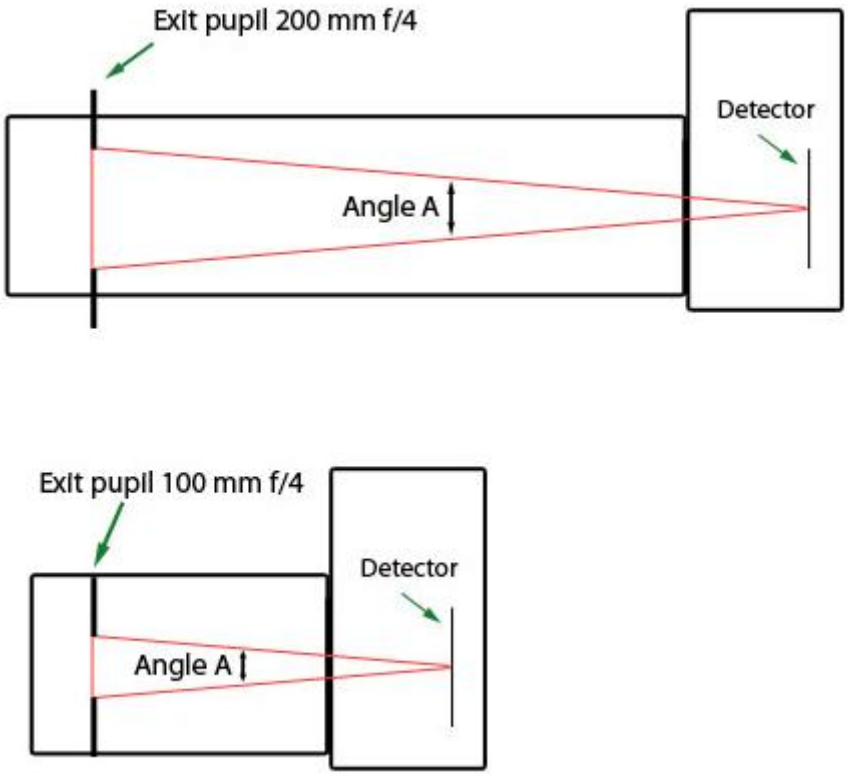


Рис. 1.4 Схема двох об’єктивів з різною вхідною зіницею, але однаковим кутом A.

Якщо зменшити об’єктив до f/8 на моєму 200-мм об’єктиві, вхідна зіниця становитиме 25 мм (=200/8) – половина цього при f/4. Площа зіниці становитиме 1/4 площі зіниці f/4, і вона пропускатиме 1/4 більше світла та потребуватиме витримки в 4 рази більшої, щоб отримати таку саму кількість світла на детектор (для аналогічного контакт). Зупинка на півдорозі між f/4 і f/8 пропускатиме вдвічі менше світла. Це буде f/5,6 (а не f/6, посередині між двома, а 1 на корінь квадратний з 2 між ними).

Основні стопи, які ви побачите на об’єктиві, будуть f/1, f/1.4, f/2, f/2.8, f/4, f/5.6, f/8, f/11, f/16, f/22 , f/32... Кожна зупинка пропускатиме половину світла з наступним меншим числом і подовжує витримку вдвічі, щоб отримати подібну експозицію на детекторі [9].

1.5.Фокусна відстань об’єктива

Фокусна відстань, представлена зазвичай в міліметрах, є основним параметром фотооб’єктива.

Фокусна відстань об’єктива вказує нам кут огляду — яку частину сцени буде захоплено — і збільшення — наскільки великими будуть окремі елементи. Чим коротшою є фокусна відстань, тим ширшим буде кут огляду і менше збільшення (див рис. 1.5).

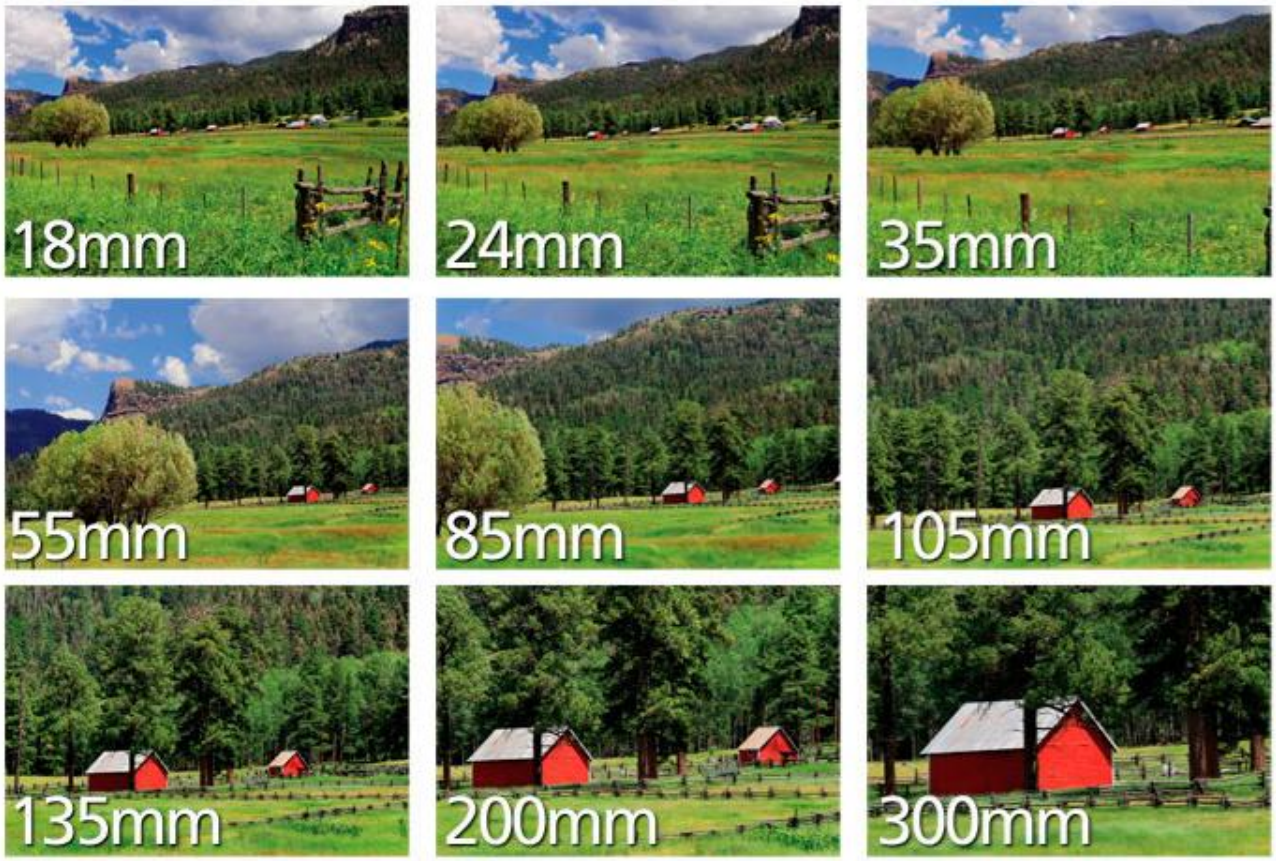


Рис. 1.5 Фокусна відстань і відповідний кут огляду [10].

1.6.Комерційні зразки телеоб’єктивів

1) AF-S Nikkor 300mm f/4.0E PF ED VR(рис. 1.6) — це довгоочікуваний спадкоємець Nikon шановного AF-S 300/4.0D. Новий об’єктив набагато менший і легший за свого попередника – фактично навіть порівняно з будь-яким іншим

повнокадровим об’єктивом 300/4.0, наявним на ринку. Крім того, він має останню версію стабілізації зображення VR від Nikon. Але він також значно дорожчий, ніж старий 300/4.0D, який мав репутацію дуже гарної якості зображення та слабкого кріплення для штатива/

Фокусна відстань 300 мм сьогодні не здається дуже великою: багато зумів досягають 300 мм на довгому кінці. Але хоча 300 мм трохи замало для серйозних птахівників, цього достатньо, щоб захопити рухливих або великих тварин із достатньої відстані. Тож об’єктив 300 мм f4.0 — це свого роду компроміс: гарний радіус зйомки в поєднанні з хорошим відділенням об’єкта від фону на діафрагмі f4, але не надто вузький для об’єкта зйомки або надто великий за розміром і вагою, щоб зробити його непрактичним [11].

Рис. 1.6 AF-S Nikkor 300mm f/4.0E PF ED VR [12]

-Фокусна відстань: 300 мм

-Максимальна діафрагма: f/4

-Мінімальна діафрагма: f/32

-Конструкція лінзи: 16 елементів у 10 групах

-Кут зображення: 8°20′

-Найближча відстань фокусування: 1,4 м

-Кількість пелюсток діафрагми: 9

-Вага: 755 г

2) Nikon AF-S Nikkor 300mm f/4D ED-IF — це відносно легкий і компактний телеоб’єктив із фіксованою фокусною відстанню, призначений для використання з цифровими дзеркальними фотокамерами Nikon FX (повнокадрові) і DX (APS-C). Пожертвувавши яскравістю заради розміру, ваги та вартості, об’єктив 300mm F4 є найбільш корисним під час зйомки при хорошому освітленні або міцно закріпленому на штативі та забезпечує чудову якість зображення навіть на F4. Цей об’єктив не забезпечує зменшення вібрацій, але має вбудований двигун фокусування SWM для швидкого й тихого автофокусування на всіх поточних корпусах цифрових дзеркальних фотокамер Nikon [13].

Рис. 1. 7 Nikon AF-S Nikkor 300mm f/4D ED-IF [14]

-Фокусна відстань: 300 мм

-Максимальна діафрагма: f/4

-Мінімальна діафрагма: f/32

-Конструкція лінзи: 10 елементів у 6 групах

-Кут зображення: 9°20′

-Найближча відстань фокусування: 1,45 м

-Кількість пелюсток діафрагми: 9

-Вага: 1440 г

3) Об’єктив EF 300mm f/4L IS USM, що поєднує універсальну фокусну відстань телеоб’єктива зі скромним форм-фактором, є найпопулярнішим об’єктивом Canon в елітній L-серії оптики. Два елемента з наднизькою дисперсією використовуються для значного зменшення колірної окантовки та хроматичних аберацій, щоб досягти високого ступеня чіткості, а також було застосовано покриття Super Spectra для підтримки контрастності та точності кольору під час роботи в умовах складного освітлення. Доповнюючи характеристики зображення, цей об’єктив 300 мм f/4 також оснащений стабілізатором зображення, який мінімізує тремтіння камери на дві ступені для більш чіткої зйомки з рук. Кільцевий USM також використовується для швидкого й тихого автофокусування разом із постійним ручним керуванням фокусуванням. Крім того, до комплекту входить знімний обертовий комір штатива для стабільного використання об’єктива на штативі або моноподі [15].

Рис. 1.8 Canon EF 300mm f/4L IS USM Lens [16]

-Фокусна відстань: 300 мм

-Максимальна діафрагма: f/4

-Мінімальна діафрагма: f/32

-Конструкція лінзи: 15 елементів у 11 групах

-Кут зображення: 8°15′

-Найближча відстань фокусування: 1,5 м

-Кількість пелюсток діафрагми: 8

-Вага: 1190 г

4) Canon EF 600mm f/4.0L IS USM, 2ей об’єктив ідеально підходить для зйомки спорту та дикої природи. Нова оптична система має один флюоритовий елемент і два елементи зі скла UD для отримання високої роздільної здатності та високого контрасту. Крім того, мінімальну дистанцію фокусування було зменшено до 18 футів (5,5 м). Подовжувач EF 2x II можна приєднати, щоб збільшити фокусну відстань до 1200 мм, зберігаючи АФ (у центральній точці фокусування з EOS-1v і EOS-3) [17].

Рис. 1.9 Canon EF 600mm f/4.0L IS USM [18]

-Фокусна відстань: 600 мм

-Максимальна діафрагма: f/4

-Мінімальна діафрагма: f/32

-Конструкція лінзи: 17 елементів у 13 групах:

покриття 1 елементу із флюориту та створення 2 елементів зі скла UD

-Кут зображення: 4°2′

-Найближча відстань фокусування: 5,5 м

-Кількість пелюсток діафрагми: 8

-Вага: 5360 г

5) Canon EF 600mm f/4L IS III USM, окрім своїх оптичних переваг, 600mm f/4 також характеризується вдосконаленою п’ятиступінчастою системою стабілізації зображення, яка має три окремі режими стабілізації для різних застосувань зйомки. Управління також доповнює складний кільцевий USM, який забезпечує швидке, тихе й точне автофокусування разом із постійним ручним фокусуванням. Електронне кільце фокусування, яке можна налаштувати, додатково сприяє точному ручному управлінню фокусуванням, надаючи три рівні чутливості фокусування для різних застосувань. Крім того, цей об’єктив захищений від атмосферних впливів для використання в складних умовах навколишнього середовища, а також має знімний обертовий комір штатива, який зручно працювати на штативі чи моноподі [19].

Рис. 1.10 Canon EF 600mm f/4L IS III USM [20]

-Фокусна відстань: 600 мм

-Максимальна діафрагма: f/4

-Мінімальна діафрагма: f/32

-Конструкція лінзи: 17 елементів у 13 групах:

-Кут зображення: 4°10′

-Найближча відстань фокусування: 4,2 м

-Кількість пелюсток діафрагми: 9

-Вага: 3050 г

Висновки до розділу 1

В даному розділі розглянуто літературу про телеоб’єктиви, їх параметри, переважну будову, та сферу застосування. Телеоб’єктиви набувають своєї актуальності в тому, що через свою конструкцію - позитивна лінза спереду і негативна позаду, дають змогу суттєво зменшити об’єм і вагу об’єктива, а звідси і ціну.

Головною перевагою телеоб’єктивів є їх якісне спостереження за віддаленими об’єктами, а це в свою чергу дає різноманітний спектр застосування телеоб’єктивів в різних галузях, таких як спорт, спостереження за тваринами в дикій природі і найголовніше та актуальніше в наш час – військова справа, адже можна спостерігати за ворогом, мати розвідувальні дані високої якості та бути непоміченим.

РОЗДІЛ 2 ОПТИМІЗАЦІЯ. АНАЛІЗ ЗАПРОПОНОВАНИХ ПІДХОДІВ РОЗРАХУНКУ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ

2.1. Постановка задачі

Мета розділу – вибір ефективного методу оптимізації, для параметричного синтезу оптичної системи телеоб'єктива. Будуть розглянуті методи локальної оптимізації з нульового по другий порядок, а також відомі методи глобальної оптимізації [21].

2.2. Методи локальної оптимізації

В інформатиці локальний пошук є евристичним методом для розв'язання обчислювальних складних задач оптимізації. Локальний пошук можна використовувати для задач, які можна сформулювати як пошук рішення, що максимізує критерій серед кількох варіантів рішення. Алгоритми локального пошуку переходять від рішення до рішення в просторі варіантів рішень (простір пошуку), застосовуючи локальні зміни, доки не буде знайдено рішення, яке вважається оптимальним, або поки не мине обмеження часу [21,22].

Алгоритми локального пошуку широко застосовуються до численних складних обчислювальних проблем, включаючи проблеми з інформатики (зокрема, штучного інтелекту), математики, дослідження операцій, інженерії та біоінформатики [23].

Локальний пошук (локальна оптимізація) – пошук, який здійснює алгоритми локального пошуку, групи алгоритмів, які ведуть пошук лише поточним станом, не враховуючи попередні стани, які були пройдені [23].

Схема локальної оптимізації наведена на рисунку 2.1.

Рис 2.1 – Схема локальної оптимізації [21]

Схема дає зрозуміти три основні напрямки локальної оптимізації:

1) Оптимізації нульового порядку;

2) Оптимізації першого порядку;

3) Оптимізації другого порядку.

2.2.1. Методи нульового порядку (методи прямого пошуку)

Методи нульового порядку (прямі методи) не мають явного математичного доказу, але базуються на дійсних положеннях та емпіричних даних [24].

Метод прямого пошуку не є найефективнішим, оскільки наявність першої та другої похідних оцінюваної функції може значно збільшити швидкість збіжності. Проте абсолютна перевага методів прямого пошуку полягає в тому, що такі задачі оптимізації можна розв’язувати, коли функція оцінки не диференційована або обчислення градієнтів і матриць Гессе є досить складним (що досить часто зустрічається на практиці).

Найпростіший спосіб мінімізувати цільову функцію, використовуючи тільки її власні значення, - це чергувати змінні. Цей метод відомий як метод координатного спуску [25].

Метод координатного спуску: Починаючи з початкової точки, виконуються кроки паралельні одній з координат осі для обчислення значення цільової функції. При зменшенні значення цільової функції рух продовжується в тому ж напрямку, а при збільшенні значення цільової функції повертається до попередньої точки і робить крок у зворотному напрямку. Цю процедуру слід виконувати доти, доки не буде знайдено оптимальну точку (рис.2.2) [26].

Координатний спуск не застосовують під час розриву лінії рівня, тобто, на поверхнях з каньйонами чи хребтами.

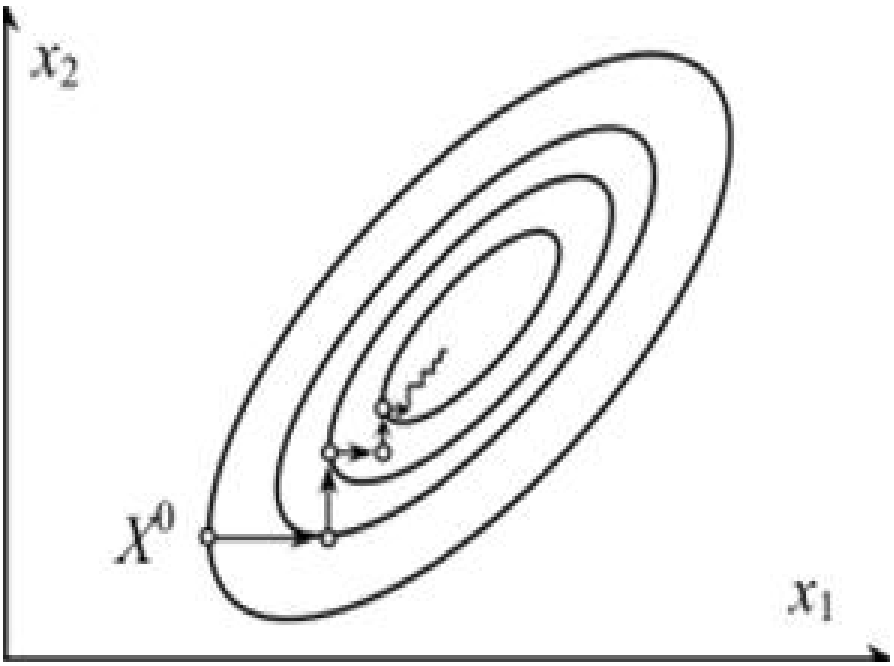


Рисунок 2.2 – Траєкторія руху методом по-координатного спуску [26]

Основна ідея методу випадкового пошуку полягає в тому, що напрямок руху вибирається випадковим чином. Якщо цільова функція зменшується, вона продовжує рухатися у вибраному напрямку. Якщо ні, вам доведеться повернутися на один крок назад і знову вибрати випадковий напрямок пошуку[27].

Усі методи випадкового пошуку реалізовані з використанням ітераційних виразів.

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + \xi^{(k)} (2.1)$$

де k –кількість ітерацій. ξ(k)-випадкова величина.

Популярність методу випадкового пошуку пояснюється його простотою та широкими можливостями модифікації методу користувачами самостійно.

Процедура симплексного пошуку Спендлі, Хакса і Химсворта полягає в тому, що експериментальна вибірка, що містить найменшу кількість точок, є позитивним симплексом. Правильний симплекс у N-мірному просторі–це багатогранник, утворений N+1 рівновіддаленими вершинами. Наприклад, для двох змінних симплекс є рівностороннім трикутником. У тривимірному просторі симплекс є тетраедр. Алгоритм симплексного пошуку використовує важливу властивість симплексу. Це дозволяє побудувати новий симплексна будь-якій грані першої грані, перемістити вибрану вершину на відповідну відстань уздовж лінії, що проходить через центроїди інших вершин. Початковий симплекс. Отримані таким чином крапки є вершинами нового симплексу, відкидаючи вершини першого симплексу, вибраного при побудові. Не важко помітити, що при переході до нового симплекс потрібно одне обчислення цільової функції. Рис.2.3. На ній показаний процес побудови нового симплексу на площині[28].

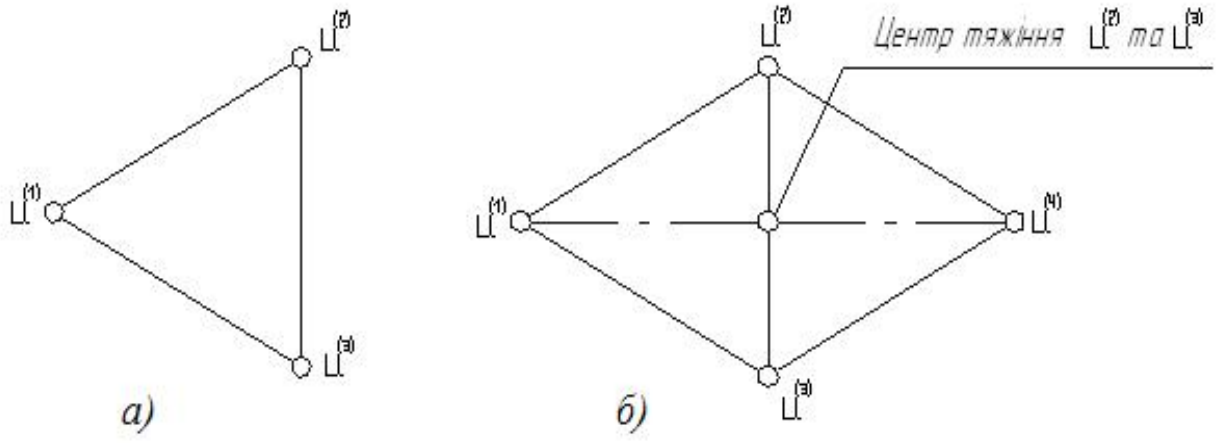


Рисунок 2.3 – Побудова нового симплексу: *а* – початковий симплекс; *б* – новий симплекс [28]

Алгоритм симплексного пошуку працює шляхом побудови позитивного симплексу у просторі незалежних змінних та оцінки значення цільової функції у кожній вершині симплексу. При цьому визначається вершина, що відповідає максимальному значенню цільової функції. Знайдені вершини проєктуються через центроїди інших вершин симплекс а на нові точки, які використовуються як вершини нового симплекса. Якщо функція згасає досить плавно, ітерації продовжуються доти, доки не буде пройдено точку мінімуму або не почнеться періодичний рух по двох і більше симплексів. У таких ситуаціях можна використовувати три правила:

Правило 1. Мінімальний бал «Обкладинка»

Якщо на попередній ітерації була створена вершина, що відповідає максимальному значенню цільової функції, замість неї використовується вершина, що відповідає наступному за величиною цільової функції [29].

Правило 2. Кругова вправа

Якщо деякі вершини симплексу не видаляються більш ніж за M ітерацій, новий симплекс слід будувати, зменшуючи розмірність симплексу за допомогою коефіцієнта стиснення. Цільова функція. Спендлі, Хекст і Хімсворт запропонували обчислювати M за такою формулою [29]:

$$M = 1{,}65\ H + 0{,}05\ H2, \quad (2.2)$$

де N - Розмірність задачі, а M округляється до найближчого цілого числа. Для цього правила необхідно встановити значення коефіцієнта зменшення.

Правило 3. Критерії завершення пошуку

Пошук припиняється, коли різниця значень функцій у вимірах симплекса чи вершинах стає досить малою. Щоб мати змогу застосовувати ці правила, нам потрібно встановити значення параметра завершення пошуку [29].

Недоліком цього є велика кількість ітерацій. Більше того, він не завжди забезпечує вирішення проблеми.

2.2.2. Методи першого порядку (градієнтні методи)

Методи прямої оптимізації дуже важливі для вирішення деяких інженерних завдань, але вони можуть вимагати обчислення великої кількості значень функцій для отримання остаточного рішення, тому метод градієнта А, заснований на використанні векторів [30].

Метод найповільнішого спуску також називають методом Коші. У МНС кожної ітерації параметр кроку вибирається з умови мінімуму оптимізованої функції у бік градієнта [31].

У цьому методі спочатку вибирається напрямок оптимального розв'язку, потім здійснюється рух в цьому напрямку, не роблячи жодного кроку, поки функція не покращає, і в якийсь момент досягається екстремум. У цей момент знову визначається напрямок пошуку (за допомогою градієнта) для знаходження нової оптимальної точки для цільової функції [32].

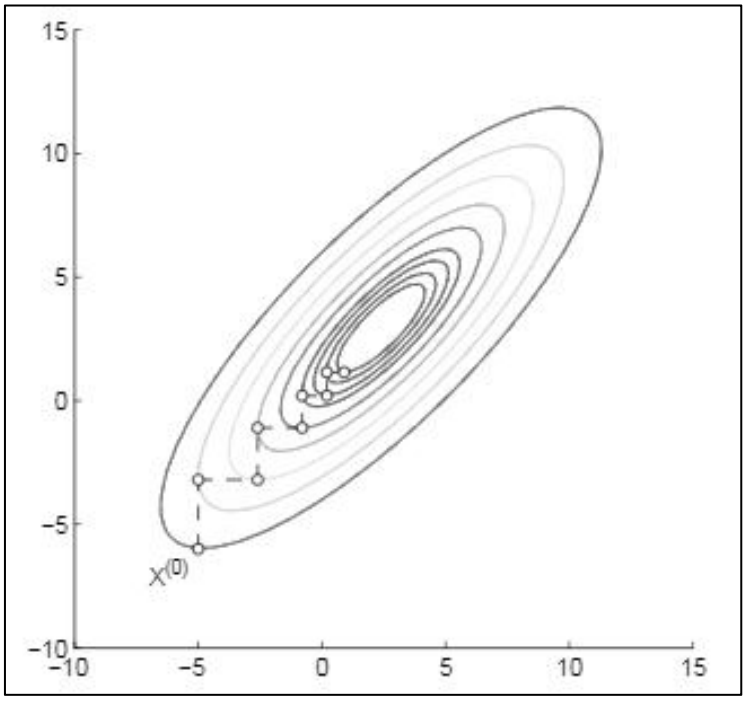


Рисунок 2.4 – Траєкторія руху при методі найшвидшого спуску [32]

Алгоритм МНС має вигляд:

$$u_i^{(k+1)} = u_i^{(k)} - h^{(k)} \quad f(\overset{\Gamma}{u}^{(k)}), \qquad (2.3)$$

$$h^{(k)} = \arg\min_h f(\overset{\Gamma}{u}_i^{(k)} - h \quad f(\overset{\Gamma}{u}^{(k)})). \qquad (2.4)$$

Одна з основних переваг цього методу пов'язана з його стійкістю та тим фактом, що процес пошуку забезпечує виконання нерівностей. Метод Коші може, у принципі, значно знизити значення цільової функції вже з початкової точки, що знаходиться на значній відстані екстремуму. Таким чином, МНС часто використовується як перший крок у реалізації градієнтних методів. Його основним недоліком є низька швидкість збіжності поблизу екстремальних значень. Тому цей метод рідко використовують як повноцінну незалежну оптимізаційну процедуру [33].

Метод сполучених градієнтів формує напрямки пошуку, що відповідають геометрії мінімізованої функції. Це значно підвищує швидкість збіжності і дозволяє, наприклад, мінімізувати квадратичні функції з позитивною симетричною матрицею H за кінцеве число кроків n (рівне числу змінних функції). Метод пов'язаних градієнтів також можна використовувати для мінімізації не квадратичних функцій, оскільки гладкі функції навколо точки мінімуму добре апроксимуються квадратичними функціями. І тут вони перестають бути кінцевими і стають ітераційними [34].

2.2.3. Методи другого порядку

Прямий пошук та градієнтні методи дуже ефективні лише на ранніх стадіях мінімізації. Наступним кроком має бути застосування методу швидкої збіжності, коли точки пошуку близькі до точки мінімуму. Найважливішим класом методів цього є квадратичні методи, зокрема методи Ньютона і споріднені їм квазі-ньютоновскі методи. Вони дозволяють враховувати структуру цільової функції [35].

Метод Ньютона. Нехай функція f(x) двічі безперервно диференційована і нехай xk - деяка точка простору пошуку. З курсу математичного аналізу відомо, що функція, що двічі безперервно диференціюється в досить малій околиці точки xk, може бути розкладена в ряд Тейлора, відкидаючи члени ступеня 3 і вище [36].

$$f(x)\approx f(x_k)+\nabla^T f(x_k)(x-x_k)^T+\frac{1}{2}(x-x_k)^T G(x_k)(x-x_k), \quad (2.5)$$

де $G(x_k)$- матриця Гессе

Якщо функція f(x) в деякій точці x′ має мінімум, то в цій точці

$$\nabla^T f(x')+G(x_k)(x'-x_k)=0. \quad (2.6)$$

Звідси слідує, що якщо матриця $G(x_k)$ має обернену, то точку x′ можна знайти за формулою:

$$x'=x_k-G^{-1}(x_k)\nabla f(x_k) \quad (2.7)$$

Повторюючи цю процедуру отримаємо рекурентну формулу метода Ньютона:

$$x_{k+1}=x_k-G^{-1}(x_k)\nabla f(x_k), \quad k=0,1,2\ldots. \quad (2.8)$$

У задачі знаходження мінімуму будь-якої квадратичної функції за позитивною матрицею других похідних метод Ньютона дає рішення одну ітерацію незалежно від вибору початкової точки. У випадку метод Ньютона може розходитися, якщо початкове наближення далеко від точки мінімуму. Схожість методу Ньютона може бути гарантована тільки в тому випадку, якщо перше наближення знаходиться в досить малій околиці мінімуму, і якщо матриця Гессе позитивно визначена і добре вирівняна. Тому на практиці цей метод зазвичай використовується в поєднанні з одним з методів, що швидко сходяться далеко від локального мінімуму [37].

Метод найменших квадратів (МНК) займає виняткове становище серед методів математичної статистики завдяки широкій галузі застосування. Завдання МНК полягає в тому, щоб оцінити закономірність, що спостерігається, на тлі випадкових флуктуацій і використовувати її для подальших обчислень, особливо передбачень [38].

Метод найменших квадратів - це метод регресійного аналізу, який використовується для статистичної оцінки параметрів регресійної моделі на основі емпіричних даних. Відповідно до цього методу параметри моделі повинні відповідати рівнянню регресії, що забезпечує мінімальну суму відхилень квадратів емпіричних даних від розрахованих за рівнянням регресії. Тому з двох різних апроксимацій однієї і тієї ж емпіричної функції, представлених у табличній формі, найкращою вважається та, у якої сума квадратів відхилень найменша [38,39].

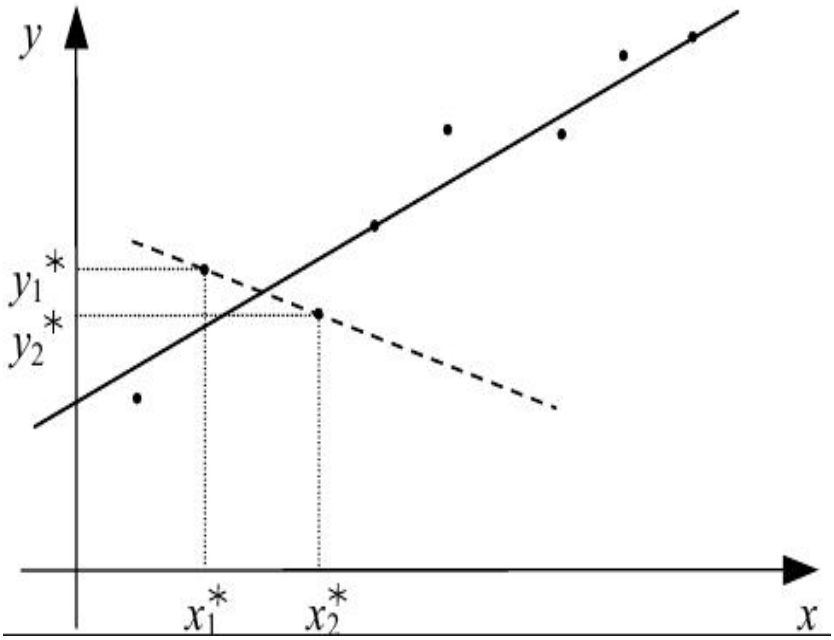


Рисунок 2.5 – Ілюстрація методу найменших квадратів [39]

Одним із недоліків цього є те, що виявлені мінімуми часто виходять за межі лінійної області. Тому робилися неодноразові спроби вдосконалити МНК. В даний час для оптимізації оптичних систем широко використовується метод демпфований найменших квадратів (DMLS) [39,40].

Демпфований спосіб найменших квадратів. Ідея цього методу зводиться до обмеження довжини вектора рішення стандартним методом найменших квадратів, що покращує збіжність. Ця мета досягається додаванням до функції якості

додаткової складової p2 |Δx|. (Демпфер). Наслідуючи цю ідею, замість старої оцінної функції φ розглядається нова оцінна функція:

$$\varphi_p=\varphi+p^2|\Delta x|^2 \quad (2.9)$$

Для її оптимізації приймається метод найменших квадратів. В даному випадку для вектора градієнта і матриці Гессе отримують вираз:

$$g_p=g+p^2|\Delta x|;\ H_p=H+p^2E, \quad (2.10)$$

де E - одинична матриця, а для визначення вектора Δx – рівняння

$$G_0+H_p\Delta x=0 \quad (2.11)$$

Можна зробити висновок, що ДМНК відрізняється від МНК тим, замість матриці H використовується матриця H_p. Воно виходить з H додаванням того ж позитивного числа головної діагоналі (демпферу). Ця операція називається демпфування матриці H. Тому перехід від МНК до ДМНК здійснюється за допомогою простої операції розпаду. Наслідуючи вище викладене, можна відзначити основні характеристики ДМНК [41].

Для ненульових демпферів рішення за рівнянням (2.11) завжди існує, незалежно від відношення числа параметрів до функції та наявності «зайвих» або лінійно-пов’язаних параметрів.

Вибираючи p^2, рішення ДМНК, за дане рівнянням (2.11), дозволяє отримати кращу точку на фіксованій відстані від першої точки в лінійній моделі. Траєкторія руху точки в межах ДМНК може бути побудована у різний спосіб [41, 42].

2.3. Методи глобальної оптимізації

Глобальна оптимізація -розділ прикладної математики та чисельного аналізу, спрямований на оптимізацію, що допомагає вирішувати безліч багатогранних завдань, що не піддаються аналітичному аналізу. Результатом дії GO є пошук найкращого елемента із безлічі можливих елементів , які відповідають певним критеріям. Ці критерії виражаються в математичних функціях і називають цільовими функціями [43].

Останніми роками було розроблено значну кількість алгоритмів ГО, як детермінованих, і ймовірнісних, заснованих на рецептах. Серед останніх виділяють методи Монте-Карло (випадковий пошук, імітація відпалу, метод вибірки) та еволюційні алгоритми (генетичний алгоритм, метод стратегії еволюції, метод диференціальної еволюції, метод бджолиного рою тощо). що не використовують латентні точкові множини, метод колоній), метод пошуку гармонік тощо) [44].

Сучасна схема методів глобальної оптимізації наведена на рисунку 2.6.

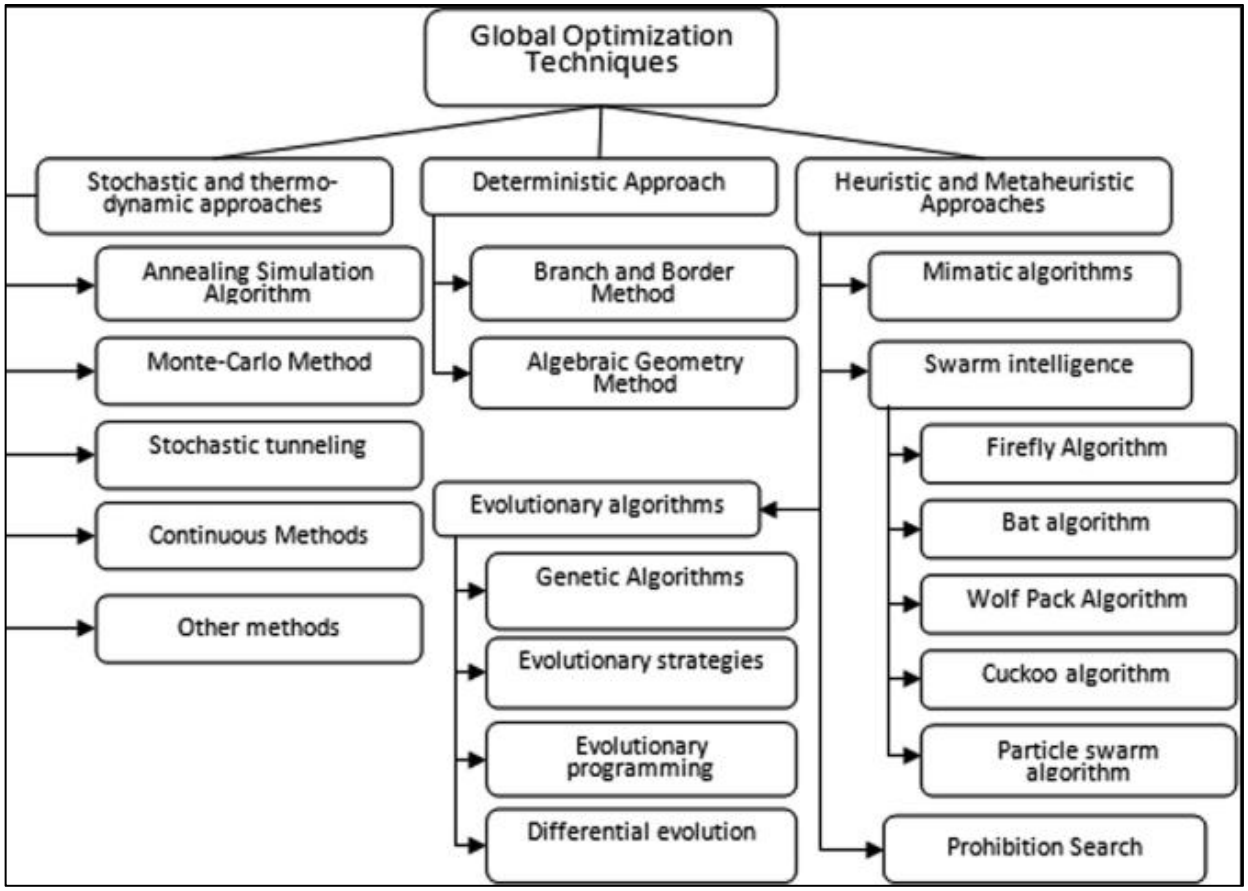


Рисунок 2.6 – Класифікація методів глобальної оптимізації

Основними перевагами таких методів є:

- Збільшена швидкість.
- Висока надійність та стабільність.

- Нечутливість до нерегулярної поведінки цільової функції, наявність випадкових помилок під час обчислення функції.

- Щодо проста внутрішня реалізація.

- Низька чутливість до збільшення розмірності оптимізаційної множини.

- Потенційні природні входи у процес пошуку операцій навчання та самонавчання.

- В рамках відомих схем випадкового пошуку легко будувати нові алгоритми, що реалізують різні евристичні процедури адаптації.

Останніми роками було розроблено значну кількість алгоритмів ГО, як детермінованих, і заснованих на ймовірнісних приписах. Серед останніх виділяють методи Монте-Карло(випадковий пошук, імітація відпалу, метод вибірки, метод табу та ін.) та еволюційні алгоритми (генетичний алгоритм, метод стратегії еволюції, метод диференціальної еволюції, метод бджолиного рою тощо). що не використовують латентні точкові множини (метод колоній, метод гармонійного пошуку та ін.) широко використовуються [45].

2.3.1. Алгоритм імітаційного відпалу

Моделювання відпалу ґрунтується на теорії термодинамічних процесів, у яких матеріали нагріваються та повільно охолоджуються для отримання кристалічної структури. Кроки виконуються у випадкових напрямках, починаючи з випадково вибраної точки у просторі пошуку. Якщо цей крок призводить до точки з нижчим значенням оптимізації, він приймається. Якщо значення оптимізації призводить до великої точки, воно приймається з ймовірністю P(I). де I – час. Функція P(I) спочатку близька до I, але поступово зменшується до нуля, подібно до твердотілого охолодження. Тому на початку процесу моделювання

приймаються всі ходи, але зі зниженням «температури» ймовірність негативних ходів зменшується. Негативні кроки можуть бути необхідні, коли необхідно уникнути локальних оптимумів, але надто багато негативних кроків

можуть відхилятися від глобальних оптимумів. Цей метод нині активно досліджується та успішно застосовується у багатьох областях [46,47].

З моменту появи 1983 року моделювання відпалу застосовувалося на вирішення широкого кола завдань у різних галузях. Більш ніж 20-річний досвід дозволив зробити такі загальні спостереження:

- Ви можете отримати високоякісне рішення, але для цього може знадобитися багато обчислень.

- У багатьох практичних ситуаціях, коли реальні алгоритми не працюють, моделювання відпалу має значні переваги в універсальності застосування та простоті реалізації.

Таким чином, моделювання відпалу -це алгоритм, який має бути у кожного математика та програміста у своєму наборі інструментів.

На рис. 2.7. Моделювання відпалу шукає максимуми. Мета тут–досягти найвищої точки. Однак через велику кількість локальних максимумів тут недостатньо простого алгоритму сходження. Світові максимуми виявляються по повільному зниженню температури [48].

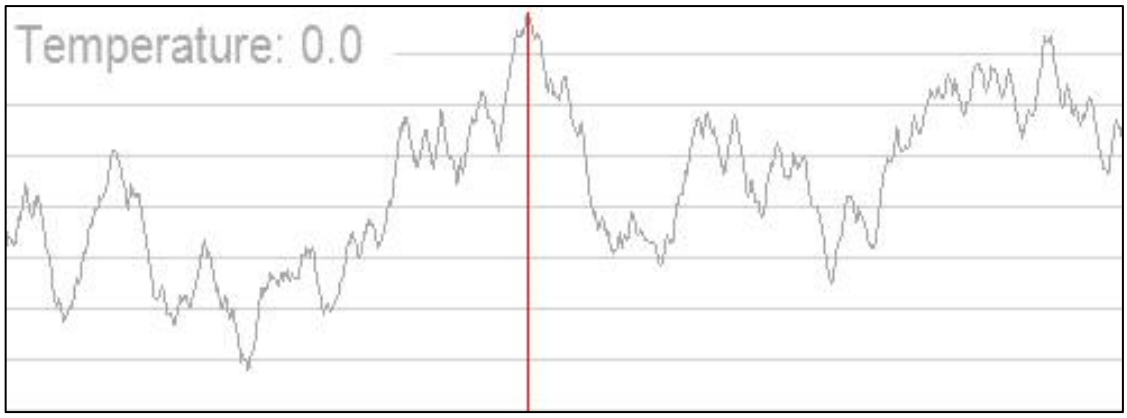


Рисунок 2.7 – Імітація відпалювання шукає максимум [48]

2.3.2. Грубий випадковий пошук (метод Монте-Карло)

Єдиного методу Монте-Карло немає. Цей термін описує великий та широко використовуваний клас підходів. Однак ці підходи переважно використовують один шаблон [49]:

- Визначте діапазон можливих вхідних даних.

- Випадково згенеруйте вхідні дані з області, визначеної вище, використовуючи заданий розподіл ймовірностей.

- Виконайте детерміновані обчислення на вхідних даних.

- Проміжні результати окремих розрахунків мають бути об'єднані у остаточний результат.

Наприклад, можна отримати наближене значення числа пі, використовуючи метод Монте-Карло:

- Намалюйте квадрат на підлозі та намалюйте коло всередині квадрата. З геометрії відношення площі вписаного кола до площі зовнішнього квадрата дорівнює пі/4.

- Поступово розподіліть кілька об'єктів однакового розміру на квадратній площі. Наприклад, це можуть бути рисові зерна.

- Співвідношення двох областей дорівнює пі/4, тому об'єкти потрапляють в області приблизно рівних пропорціях. Таким чином, підрахунок кількості об'єктів у колі та розподіл на загальну кількість об'єктів у квадраті дає наближення рі/4.

- Примноження результату на 4 дає приблизне значення числа пі.

У цій процедурі область введення є квадратом, що представляє коло. Генеруються випадкові вхідні дані. Тобто частки розкидаються по квадрату, і кожного входу виконується обчислення (проводиться перевірка, чи вписуються частки у коло). Нарешті, підсумуйте результати, щоб отримати остаточний результат, пряме наближення числа пі.

Є два важливі моменти, які слід враховувати. По-перше, якщо частинки розподілені не рівномірно, наближення буде мінімальним. По-друге, потрібна велика кількість вхідних даних. Апроксимація, як правило, незадовільна, якщо лише кілька частинок випадково потрапляють до області.

Використання методів Монте-Карло вимагає великої кількості випадкових чисел і їх використання спонукало до розробки багатьох генераторів псевдовипадкових чисел. Це набагато швидше, ніж таблиці випадкових чисел, які раніше використовувалися для статистичної вибірки [50].

На рис. 2.8 зображена ілюстрація пошуку площі методом Монте-Карло

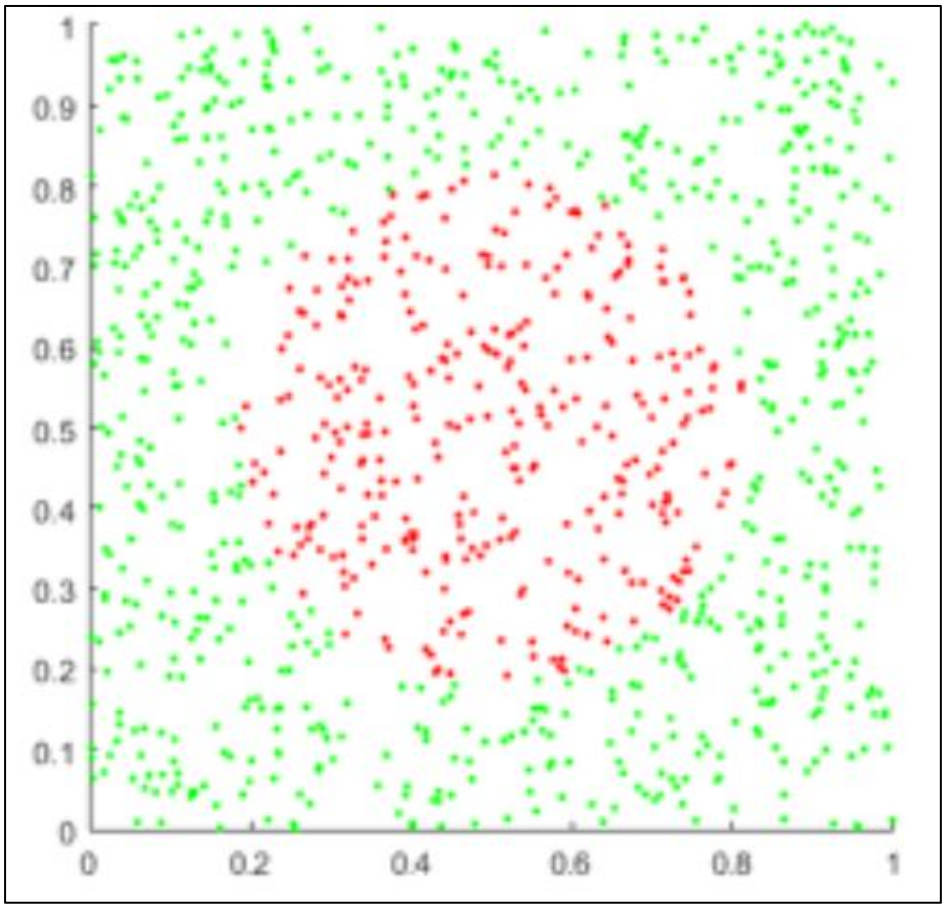


Рисунок 2.8 – Розрахунок площі методом Монте-Карло [50]

2.3.3. Метод диференційної еволюції

Диференціальна еволюція – це метод еволюційного моделювання, призначений для вирішення задач багато вимірної оптимізації. За класифікацією методів оптимізації він належить до класу імовірнісних методів, оскільки в процесі пошуку рішення використовує генератор випадкових чисел. Більше того,

він використовує деякі ідеї генетичних алгоритмів, але, на відміну від них, не вимагає використання змінних у коді бінарної селекції [51].

Цей метод є прямим методом оптимізації. Тобто за його роботи треба обчислювати лише значення цільової функції (критерій оптимізації), а чи не похідну. Загалом оптимізовані таким чином цільові функції можуть бути недиференційованими, нелінійними, багато екстремальними та сильно мінливими. Він призначений для знаходження глобальних мінімумів (або максимумів) недиференційованих, нелінійних, багатомодульних (тобто функцій з безліччю локальних екстремумів) значень багатьох змінних. Цей метод простий у реалізації та використанні, оскільки він містить кілька параметрів керування, які необхідно вибрати [51,52].

У базовій формі алгоритм можна записати так: По-перше, генерується набір векторів, які називаються поколіннями. Вектор— це точки в n- вимірному просторі, в яких визначена цільова функція, що мінімізується f(X). На кожній ітерації алгоритм випадково генерує нове покоління векторів і поєднує їх із векторами попереднього покоління. Кожне покоління має однакову кількість векторів [53].

Вектор нового покоління генерується таким чином: Для кожного вектора Xi у попередньому поколінні вибираються три різні випадкові вектори υ1, υ2, υ3 (виключаючи вектор Xi) і генеруються так звані вектори мутацій відповідно до рівняння(2.12).

$$\upsilon = \upsilon_1 + F(\upsilon_2 + \upsilon_3)(2.12)$$

де F - один із параметрів методу (зазвичай позитивна константа на відрізку[0, 2]).

Далі над вектором мутації υ виконується операція"кросовер". Суть його в тому, що кожна координата вектора замінюється відповідною координатою вихідного вектора Xi (кожна координата замінюється з певною ймовірністю і є параметром методу значень). Якщо після схрещування так званий пробний вектор виявляється краще за вектор Xi (тобто значення цільової функції зменшується), то в «новому» поколінні Xi замінюється пробним вектором., Xi залишається [54].

Метод добре адаптований до геометричних рішень задач, ілюстрація методу на рис 2.9.

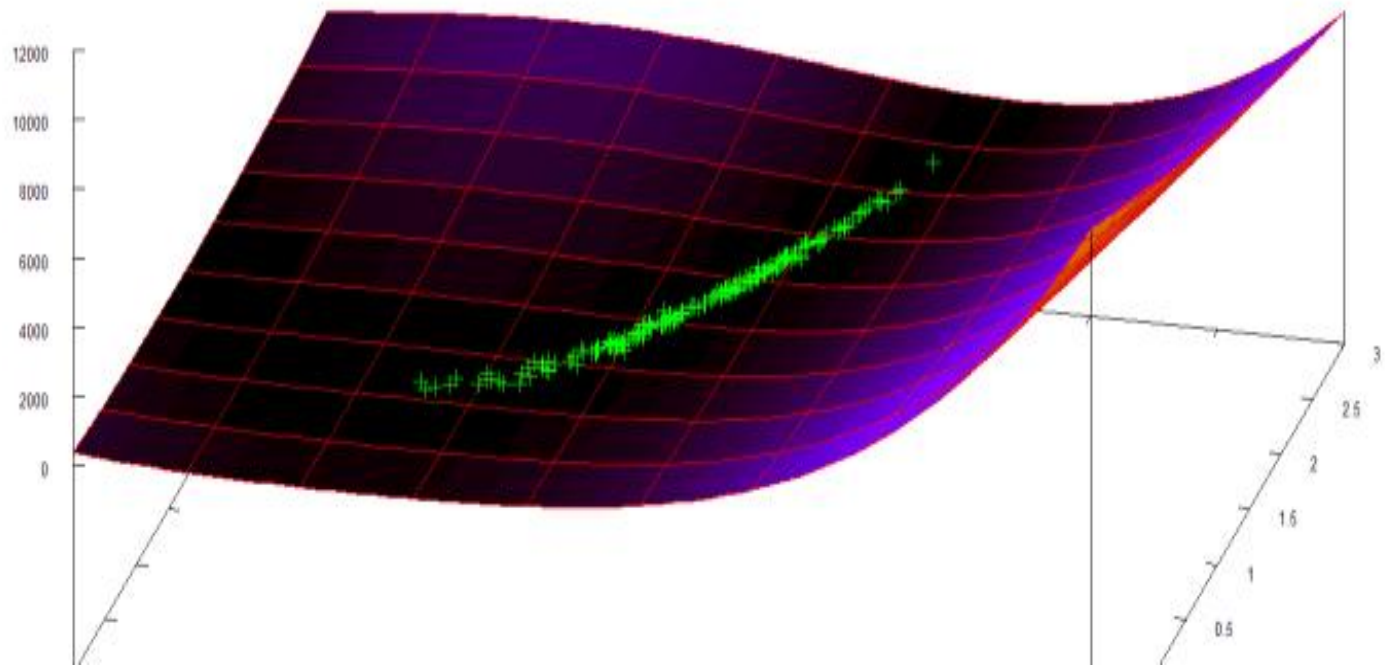


Рисунок 2.9 – Ілюстрація диференційної еволюції [55].

2.3.4. Оптимізація колективним інтелектом

Колективний інтелект — це термін, що описує складну колективну поведінку розподілених систем, що самоорганізуються. Він у теорії штучного інтелекту як метод оптимізації. Цей термін було запроваджено Херардо Беніта Ван Цзіному 1989-го року в контексті клітинних роботизованих систем. Колективний розум іноді називають роєвим інтелектом [56].

З погляду інформатики, колективний розум -це частина досліджень у галузі комп'ютерних наук, в яких ефективні чисельні методи призначені для вирішення завдань, подібних до поведінки «колективів» організмів, що вивчаються методом. Досягненнями у цій галузі є розроблені практично

алгоритми, використовувані переважно вирішення завдань комбінаторної оптимізації і завдань комівояжера [57].

Система колективного розуму, в принципі, складається з набору агентів (мульти-агентних систем), що локально взаємодіють один з одним із навколишнім середовищем. Самі агенти зазвичай дуже прості, але разом вони взаємодіють локально, створюючи так званий колективний розум. Приклади в природі включають колонії мурах, рої бджіл, рої птахів та рої риб. Ілюстрація методу на рис. 2.10

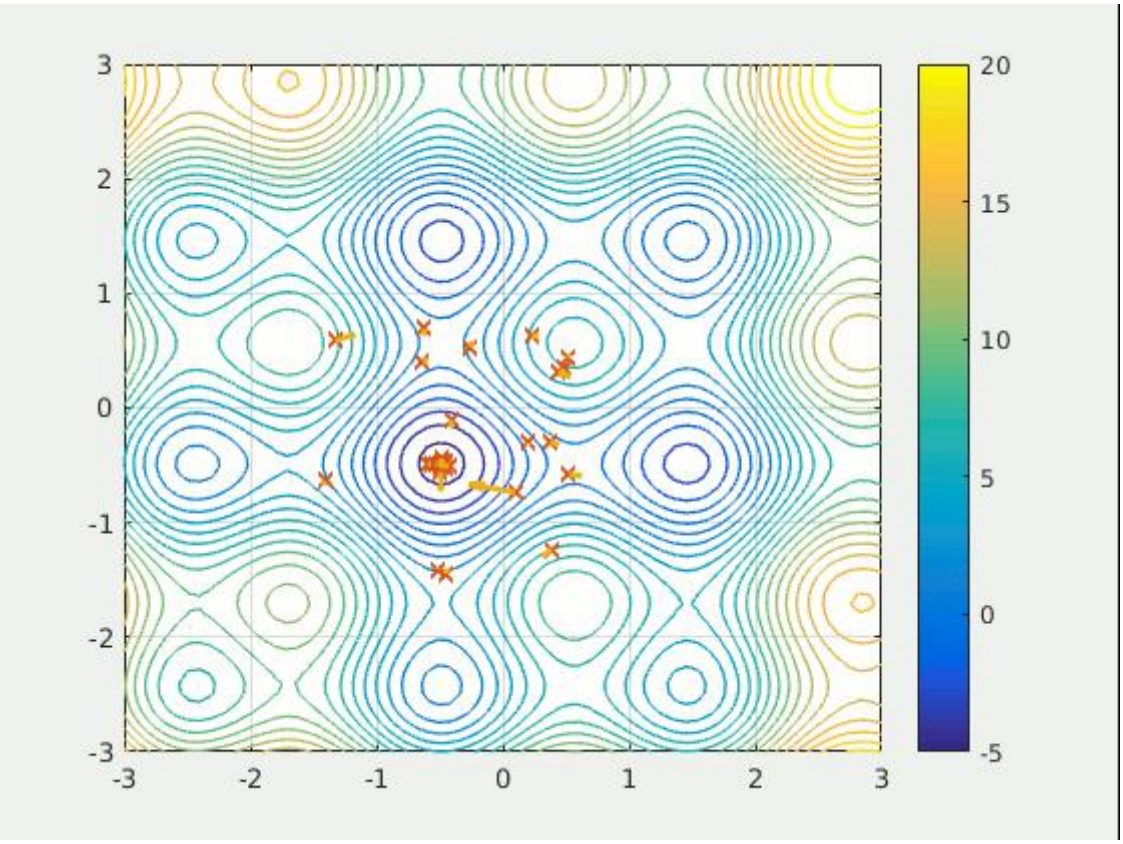


Рисунок 2.10 – Рій часток, що шукає мінімум функції [58].

Висновки до розділу 2

У цьому розділі було виявлено сильні та слабкі сторони методів локальної оптимізації та розглянули найпоширеніші з них.

Недоліками розглянутих методів оптимізації є: Координатний спуск не може бути застосований, якщо лінії рівня є розрив-частими. Метод симплексного

пошуку не гарантує остаточних результатів. Він має більше ітерацій і є найшвидшим. Метод спуску вимагає великої кількості кроків, коли мінімум функції оцінки знаходиться у лінійній області, тоді як метод найменших квадратів не гарантує, що знайдена точка мінімуму знаходиться у лінійній області.

Серед сучасних методів глобальної оптимізації було розглянуто Монте-Карло, алгоритми моделювання відпалу та диференціальну еволюцію. Ці методи не вимагають обчислення похідної та знаходять мінімальне значення цільової функції в діапазоні допусків.

Для параметричного синтезу об’єктиву було обрано метод диференціальної еволюції.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДУ

3.1. Постановка задачі

Даний розділ має мету експериментально перевірити обраний раніше метод оптимізації шляхом автоматизованого параметричного розрахунку реальних оптичних систем телеоб’єктивів. Зокрема, для вирішення поставленої задачі, було синтезовано декілька об’єктивів з фіксованою фокусною відстанню, що складаються з різної кількості лінз. Під час оптимізації було знайдено не лише осьові товщини, а й стандартні марки скла.

3.2. Запропонований підхід

Для синтезу оптичних систем телеоб’єктивів буде використовуватися один із основних сучасних методів глобальної оптимізації – метод диференційної еволюції Коші.

Алгоритми глобальної оптимізації широко використовують у багатьох сучасних програмах автоматичного синтезу оптичних систем. Synopsys Optical Solutions "КОД V", Lambda Research Corporation "ОСЛО", Zemax "ОптикСтудіо" та тощо. На жаль, що алгоритми глобальної оптимізації, закладені в перерахованих програмах, недоступні для загального розгляду, тому ці методи не підлягають аналізу та порівнянню.

Для автоматичного розрахунку оптики телеоб'єктивів в цій роботі буде використано метод диференціальної еволюції Коші, реалізований в спеціалізованому програмному забезпеченні «PODIL».

Зазначена програма має декілька основних вікон інтерфейсу.

У вкладці «Параметри системи» вказуються конструктивні параметри оптичної системи, додаткові параметри, описуються апертури поверхонь, орієнтації поверхонь у просторі тощо.

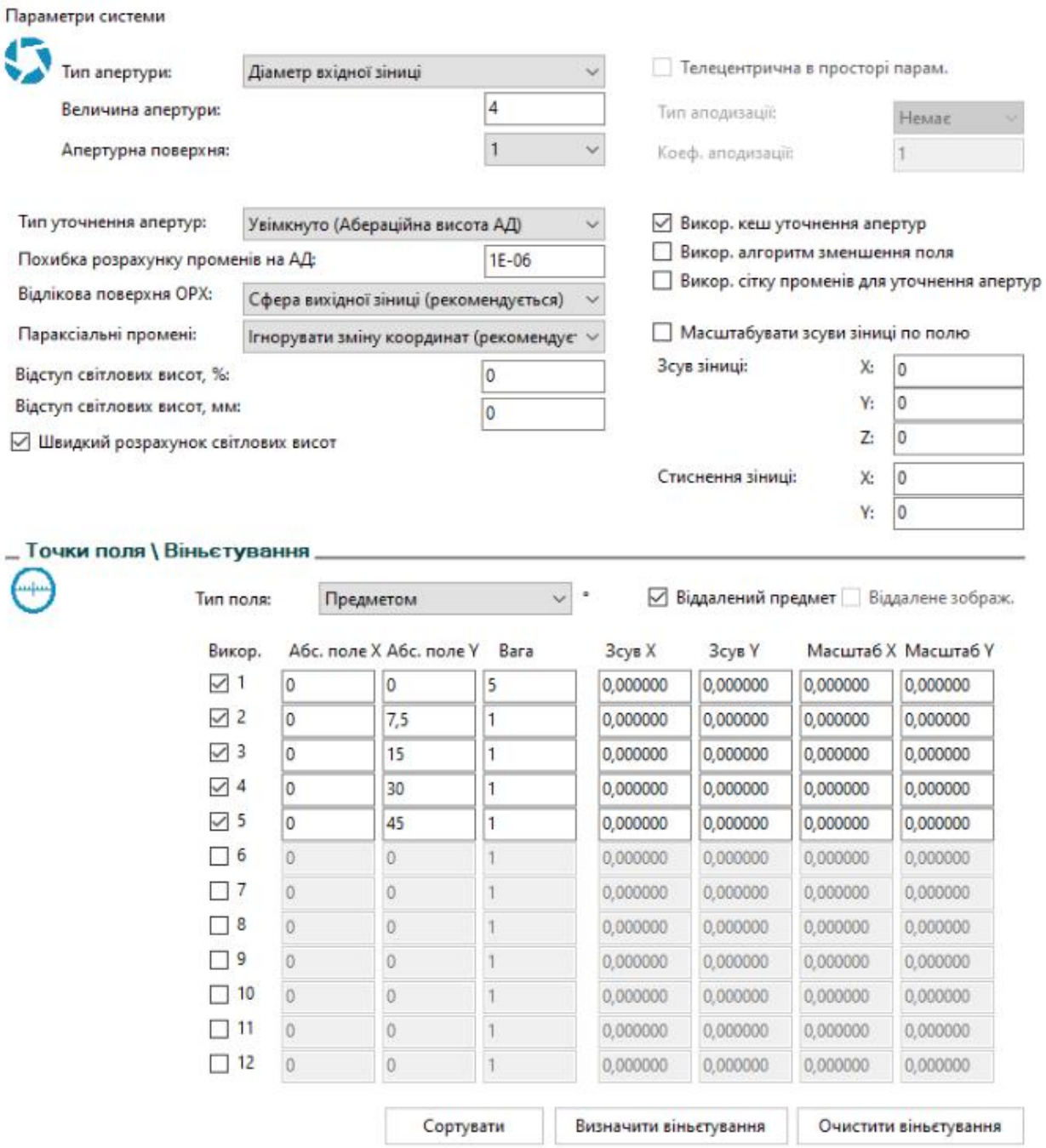


Рисунок 3.1. – «Параметри системи»

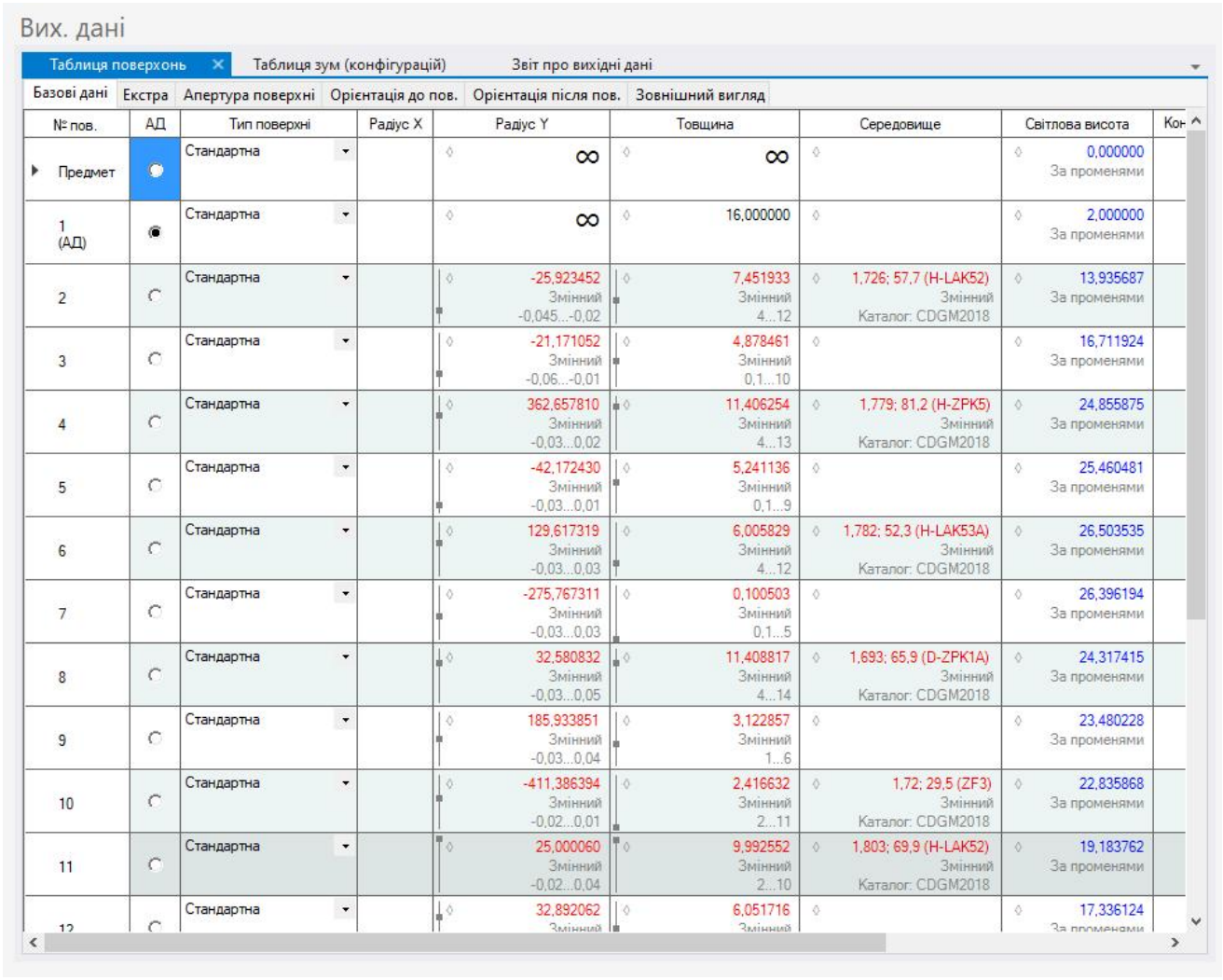


Рисунок 3.2. – Таблиця з налаштуванням поверхонь телеоб’єктивів

ЗВІТ ПРО КАРДИНАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНТА

"PODIL" Версія 1.0[153] Beta

Кардинальні параметри:

Довжина хвилі, [мкм]	F, [мм]	F', [мм]	Sf, [мм]	S'f', [мм]	Sh, [мм]	S'h', [мм]
0,47000	-15,98738	15,98738	0,98332	-0,03516	16,97070	-16,02255
0,51000	-15,98799	15,98799	0,77412	-0,01987	16,76211	-16,00786
0,55500	-16,00000	16,00000	0,59526	-0,01193	16,59526	-16,01193
0,61000	-16,02044	16,02044	0,42902	-0,00832	16,44947	-16,02877
0,65000	-16,03650	16,03650	0,33275	-0,00782	16,36925	-16,04432

Рисунок 3.3. – Вікно зі звітом про кардинальні параметри оптичної системи

У інтерфейсі програми в режимі аналізу, можуть бути показані оптична схема системи, графіки стандартних аберацій та їх опис, точкові діаграми, графіки ФРТ, ФКЕ, ФРТ, СКВ, МПФ тощо.

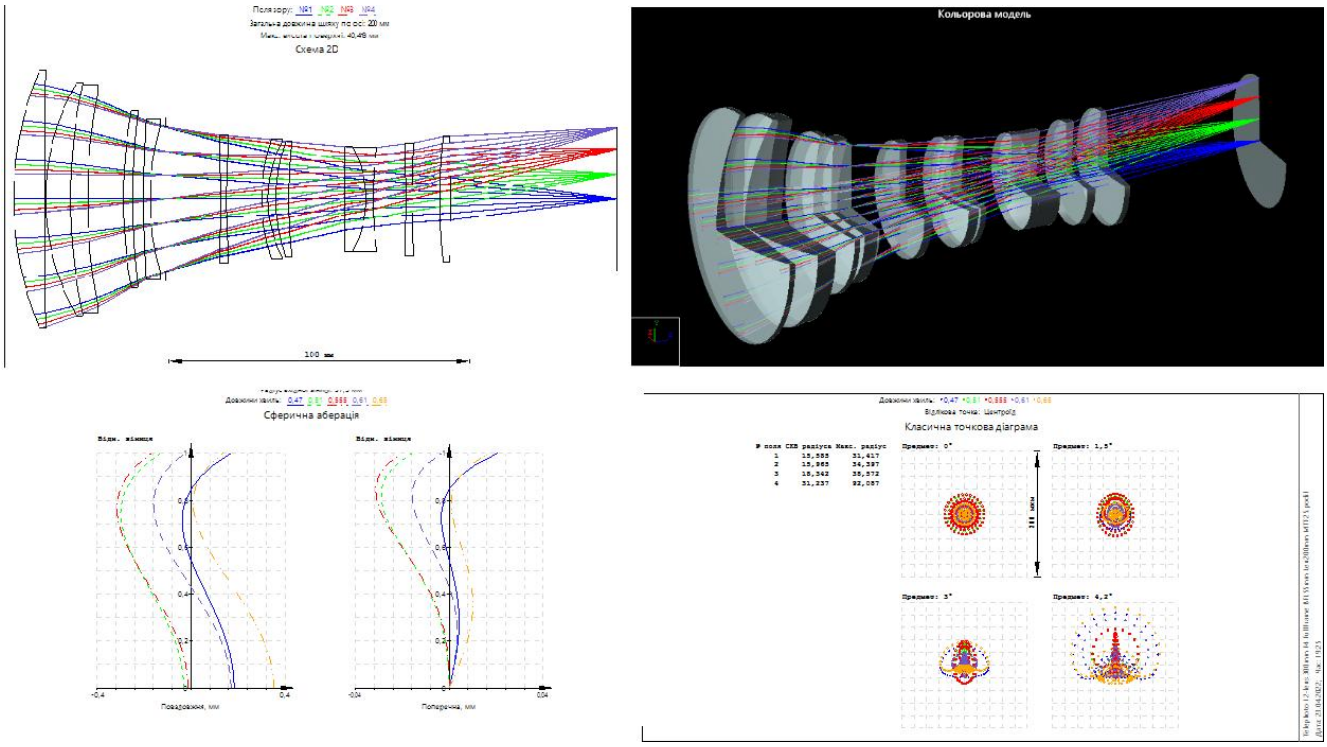
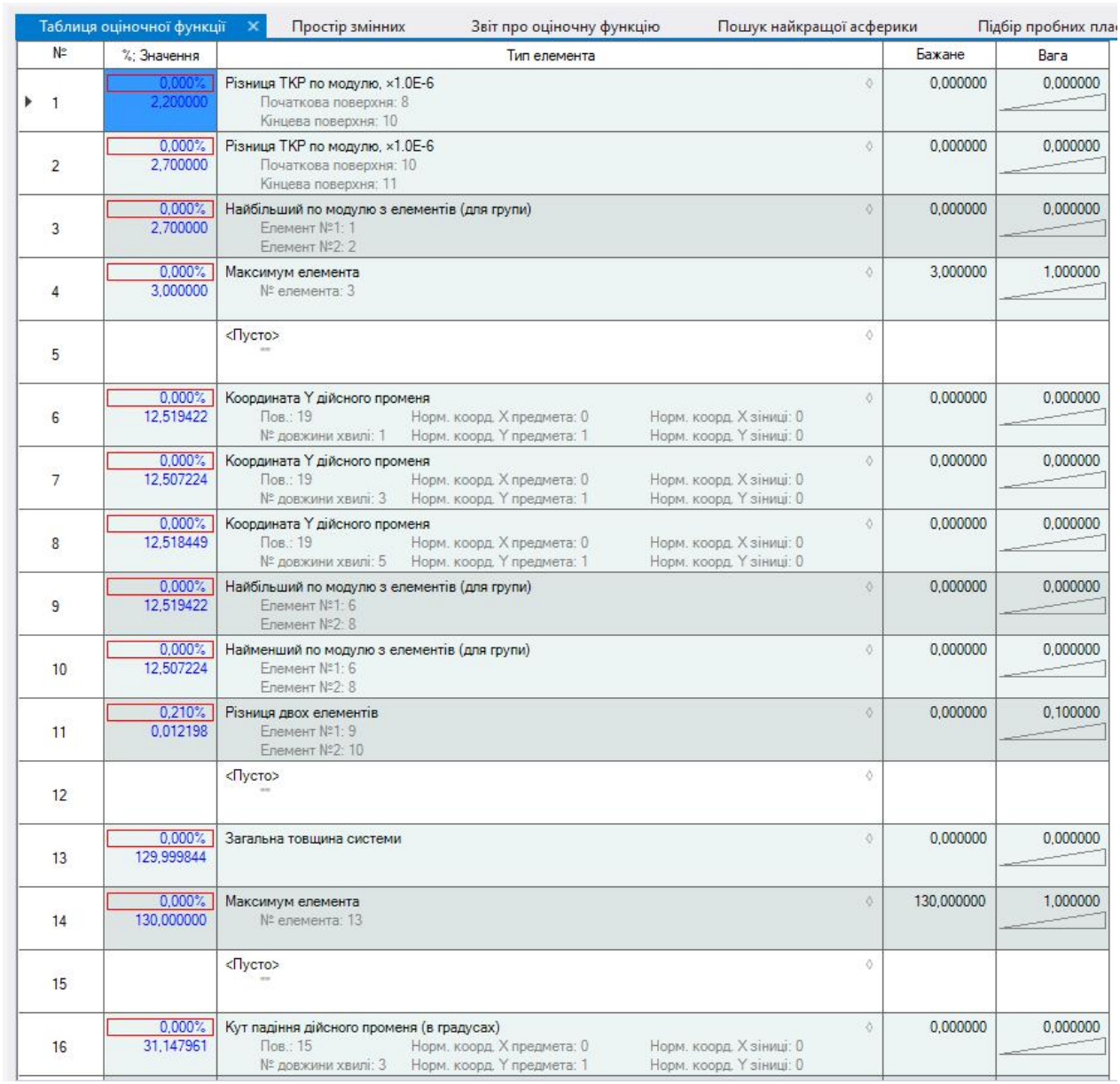


Рисунок 3.4. – Інтерфейс програми в режимі аналізу

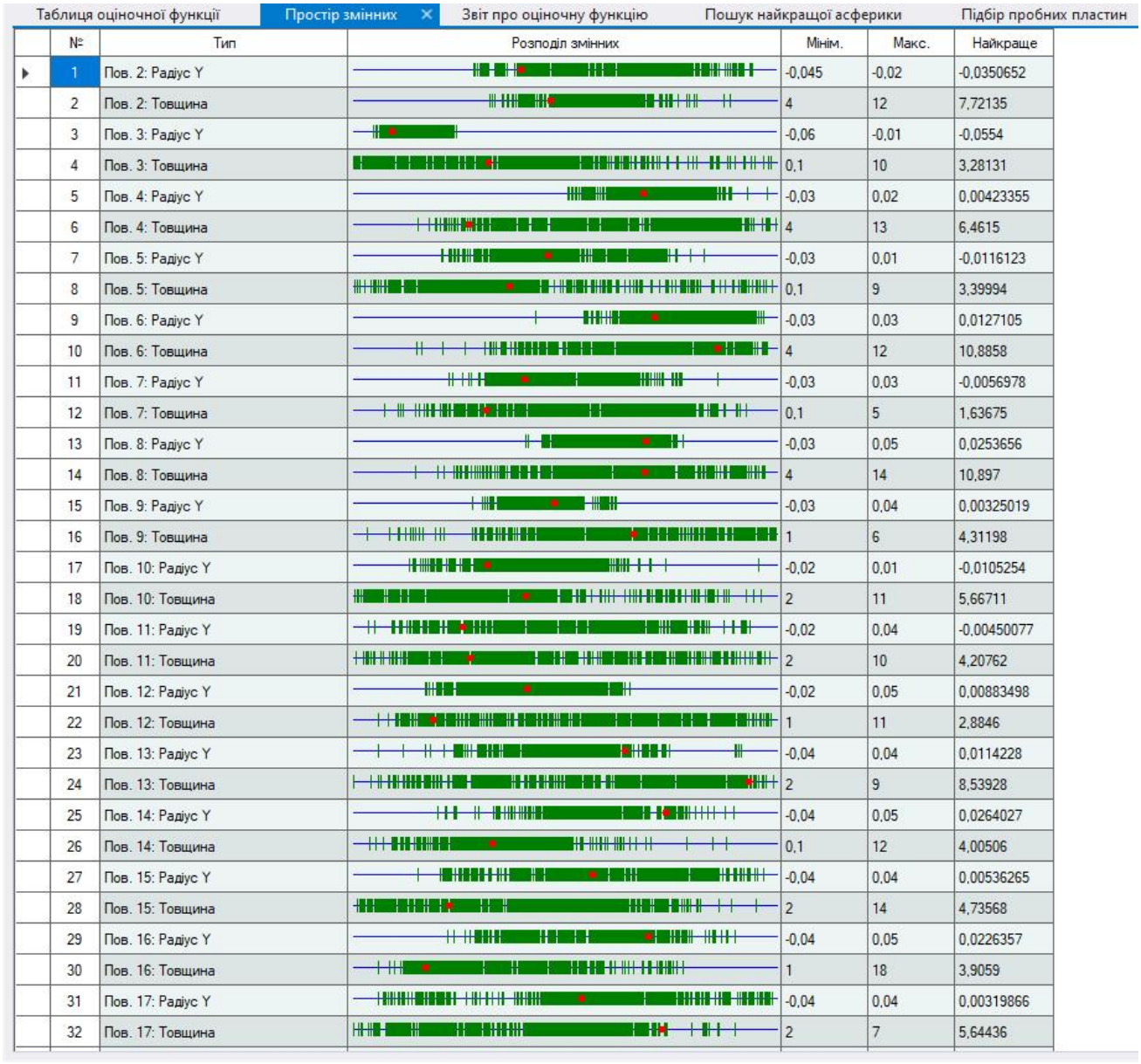
Вкладка «Оптимізація» об’єднує команди для оптимізації заданої оптичну систему. Таблиця оціночної функції дозволяє створювати стандартні оціночні функції та встановлювати додаткові обмеження та значення для певних параметрів.



Таблиця оціночної функції | Простір змінних | Звіт про оціночну функцію | Пошук найкращої асферики | Підбір пробних пла

№	%; Значення	Тип елемента	Бажане	Вага
1	0,000% 2,200000	Різниця ТКР по модулю, ×1.0E-6 Початкова поверхня: 8 Кінцева поверхня: 10	0,000000	0,000000
2	0,000% 2,700000	Різниця ТКР по модулю, ×1.0E-6 Початкова поверхня: 10 Кінцева поверхня: 11	0,000000	0,000000
3	0,000% 2,700000	Найбільший по модулю з елементів (для групи) Елемент №1: 1 Елемент №2: 2	0,000000	0,000000
4	0,000% 3,000000	Максимум елемента № елемента: 3	3,000000	1,000000
5		<Пусто> --		
6	0,000% 12,519422	Координата Y дійсного променя Пов.: 19 Норм. коорд. X предмета: 0 Норм. коорд. X зіниці: 0 № довжини хвилі: 1 Норм. коорд. Y предмета: 1 Норм. коорд. Y зіниці: 0	0,000000	0,000000
7	0,000% 12,507224	Координата Y дійсного променя Пов.: 19 Норм. коорд. X предмета: 0 Норм. коорд. X зіниці: 0 № довжини хвилі: 3 Норм. коорд. Y предмета: 1 Норм. коорд. Y зіниці: 0	0,000000	0,000000
8	0,000% 12,518449	Координата Y дійсного променя Пов.: 19 Норм. коорд. X предмета: 0 Норм. коорд. X зіниці: 0 № довжини хвилі: 5 Норм. коорд. Y предмета: 1 Норм. коорд. Y зіниці: 0	0,000000	0,000000
9	0,000% 12,519422	Найбільший по модулю з елементів (для групи) Елемент №1: 6 Елемент №2: 8	0,000000	0,000000
10	0,000% 12,507224	Найменший по модулю з елементів (для групи) Елемент №1: 6 Елемент №2: 8	0,000000	0,000000
11	0,210% 0,012198	Різниця двох елементів Елемент №1: 9 Елемент №2: 10	0,000000	0,100000
12		<Пусто> --		
13	0,000% 129,999844	Загальна товщина системи	0,000000	0,000000
14	0,000% 130,000000	Максимум елемента № елемента: 13	130,000000	1,000000
15		<Пусто> --		
16	0,000% 31,147961	Кут падіння дійсного променя (в градусах) Пов.: 15 Норм. коорд. X предмета: 0 Норм. коорд. X зіниці: 0 № довжини хвилі: 3 Норм. коорд. Y предмета: 1 Норм. коорд. Y зіниці: 0	0,000000	0,000000

Рисунок 3.5. – Таблиця складових оціночної функції



№	Тип	Розподіл змінних	Мінім.	Макс.	Найкраще
1	Пов. 2: Радіус Y		-0,045	-0,02	-0,0350652
2	Пов. 2: Товщина		4	12	7,72135
3	Пов. 3: Радіус Y		-0,06	-0,01	-0,0554
4	Пов. 3: Товщина		0,1	10	3,28131
5	Пов. 4: Радіус Y		-0,03	0,02	0,00423355
6	Пов. 4: Товщина		4	13	6,4615
7	Пов. 5: Радіус Y		-0,03	0,01	-0,0116123
8	Пов. 5: Товщина		0,1	9	3,39994
9	Пов. 6: Радіус Y		-0,03	0,03	0,0127105
10	Пов. 6: Товщина		4	12	10,8858
11	Пов. 7: Радіус Y		-0,03	0,03	-0,0056978
12	Пов. 7: Товщина		0,1	5	1,63675
13	Пов. 8: Радіус Y		-0,03	0,05	0,0253656
14	Пов. 8: Товщина		4	14	10,897
15	Пов. 9: Радіус Y		-0,03	0,04	0,00325019
16	Пов. 9: Товщина		1	6	4,31198
17	Пов. 10: Радіус Y		-0,02	0,01	-0,0105254
18	Пов. 10: Товщина		2	11	5,66711
19	Пов. 11: Радіус Y		-0,02	0,04	-0,00450077
20	Пов. 11: Товщина		2	10	4,20762
21	Пов. 12: Радіус Y		-0,02	0,05	0,00883498
22	Пов. 12: Товщина		1	11	2,8846
23	Пов. 13: Радіус Y		-0,04	0,04	0,0114228
24	Пов. 13: Товщина		2	9	8,53928
25	Пов. 14: Радіус Y		-0,04	0,05	0,0264027
26	Пов. 14: Товщина		0,1	12	4,00506
27	Пов. 15: Радіус Y		-0,04	0,04	0,00536265
28	Пов. 15: Товщина		2	14	4,73568
29	Пов. 16: Радіус Y		-0,04	0,05	0,0226357
30	Пов. 16: Товщина		1	18	3,9059
31	Пов. 17: Радіус Y		-0,04	0,04	0,00319866
32	Пов. 17: Товщина		2	7	5,64436

Рисунок 3.6. – Вікно з поточним станом глобальної оптимізації, у якому транслюються діапазони значень та поточне значення всіх заданих параметрів оптимізації

3.3. Алгоритм автоматизованого розрахунку

Загалом автоматичний розрахунок оптичних систем можна умовно поділити на два етапи:

1. Підготовка;
2. Розрахунок.

Підготовка розбивається на три під-етапи:

1) Конструктор задає вихідну систему у вигляді плоско-паралельних пластин, які визначають кількість лінз, і задає загальну структуру оптичної системи;

2) Встановлюються всі зовнішні параметри системи: поле зору, довжина хвилі, апертурна діафрагма, відносний отвір і т.д.

3) Вибір параметрів оптимізації оптичної системи та побудова оцінної функції. Генерація функції оцінки спрямована на мінімізацію хвильових та поперечних аберацій. Також на цьому етапі можна задати додаткові межі та діапазони, такі як допустима осьова товщина лінзи, осьовий повітряний зазор, кривизна оптичних поверхонь, товщина покраю лінзи та максимальне значення окремих аберацій.

Розрахунок. Цей етап є довгостроковим, оскільки складається із самих кроків глобальної оптимізації за вибраним алгоритмом. Крім того, можна максимізувати значення передавальної модуляці1ної функції певну просторову частоту.

Використовуємо методи локальної оптимізації наприкінці автоматичного розрахунку оптичної системи.

3.4. Приклад розрахунку

3.4.1. Автоматизований синтез 12-лінзового телеоб’єктива

Для розрахунку було обрано 12-лінзовий телеоб’єктив з фокусною відстанню 300 мм, діафрагмовим числом F/4 та кутовим полем зору 8,4°. Телеоб’єктив призначений для роботи у видимому спектральному діапазоні (0,47…0,65 мкм) з основною довжиною хвилі 0,555 мкм.

Для параметричного синтезу цього телеоб’єктива було встановлено обмеження на загальний осьовий розмір (тобто відстань від першої оптичної поверхні до площини зображень) – 200 мм, фіксоване значення заднього фокального відрізку – 55 мм, мінімальну та максимальну осьові товщини лінз – 2

мм і 16 мм відповідно, мінімальну товщину лінз на краю – 2 мм та максимальне допустиме значення дисторсії – 2%.

Встановлення регулятора вихідного кута апертурного променю на останній оптичній поверхні об’єктива дозволило зафіксувати значення задньої фокусної відстані телеоб’єктива (в даному випадку, тангенс цього кута становив -0,125 при діаметрі вхідної зіниці 75 мм).

Для забезпечення ходу вихідних пучків, близького до телецентричного, граничне значення кута головного променю похилого пучка в просторі зображень обмежувалося значенням 10°.

Процедура глобальної оптимізації не потребує участі конструктора, адже є повністю автоматичною.

Отримана двовимірна модель синтезованої оптичної системи телеоб’єктива наведена на рис 3.7.

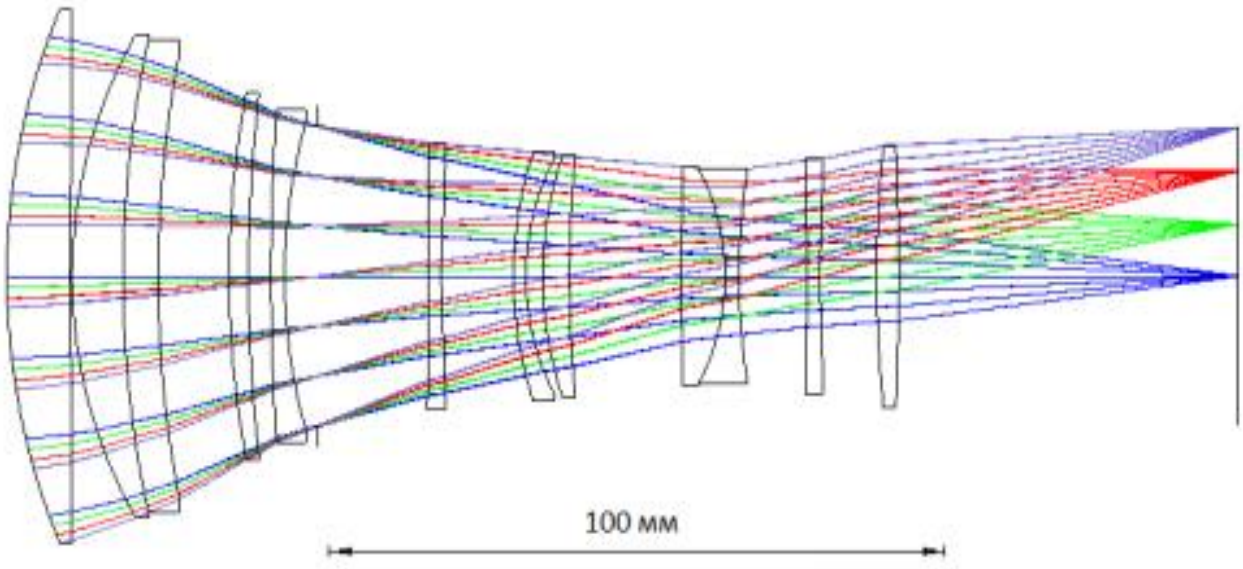


Рисунок 3.7 – Оптична схема з ходом променів отриманого 12-лінзового телеоб’єктива

Конструктивні параметри синтезованого об’єктива наведено нижче в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Конструктивні параметри 12-лінзового телеоб’єктива

Номер поверхні	Радіус кривизни поверхні, мм	Осьова товщина, мм	Середовище	діаметр, мм
Предмет	∞	∞	–	0
1	99,333000	10,259014	H-ZPK5	80,826
2	2212,632518	0,336840		79,981
3	69,890619	8,287703	H-K6	73,128
4	159,267821	5,689735	D-LAF50	71,428
5	165,547570	11,518954		67,455
6	140,477325	3,145283	H-LAK11	55,586
7	222,794227	3,641543		53,983
8	354,080764	2,225445	H-ZF71	50,358
9	80,965397	5,419233		47,00
10 (Апертурна діафрагма)	∞	17,980633		7
11	-980,391265	2,049206	H-TF5	45,521
12	282,089967	11,725979		40,444
13	57,601093	2,002277	QF3	39,983
14	37,254822	2,775658		37,653
15	54,738150	4,264789	D-FK61	36,391
16	167,515210	18,133233		36,471
17	633,315152	7,165681	ZF2	36,078
18	-32,970882	2,253412	H-ZLAF69	33,106
19	96,285204	11,069912		32,788
20	-488,391306	2,030775	H-LAK12	32,625
21	276,980369	9,242478		35,014
22	173,839444	3,781676	H-ZF71	35,536
23	-319,5388	55		39,505
Зображення	∞	0	–	39,729

Якість зображення можна оцінити за точковим графіком, показаним на рис.3.8 графіком функції поліхроматичної модуляції для різних точок поля зору, показаному нарис.3.9, та графіком дисторсії, показаному на рис.3.10. На рис.3.11 також показано точкову діаграму з дефокусуванням.

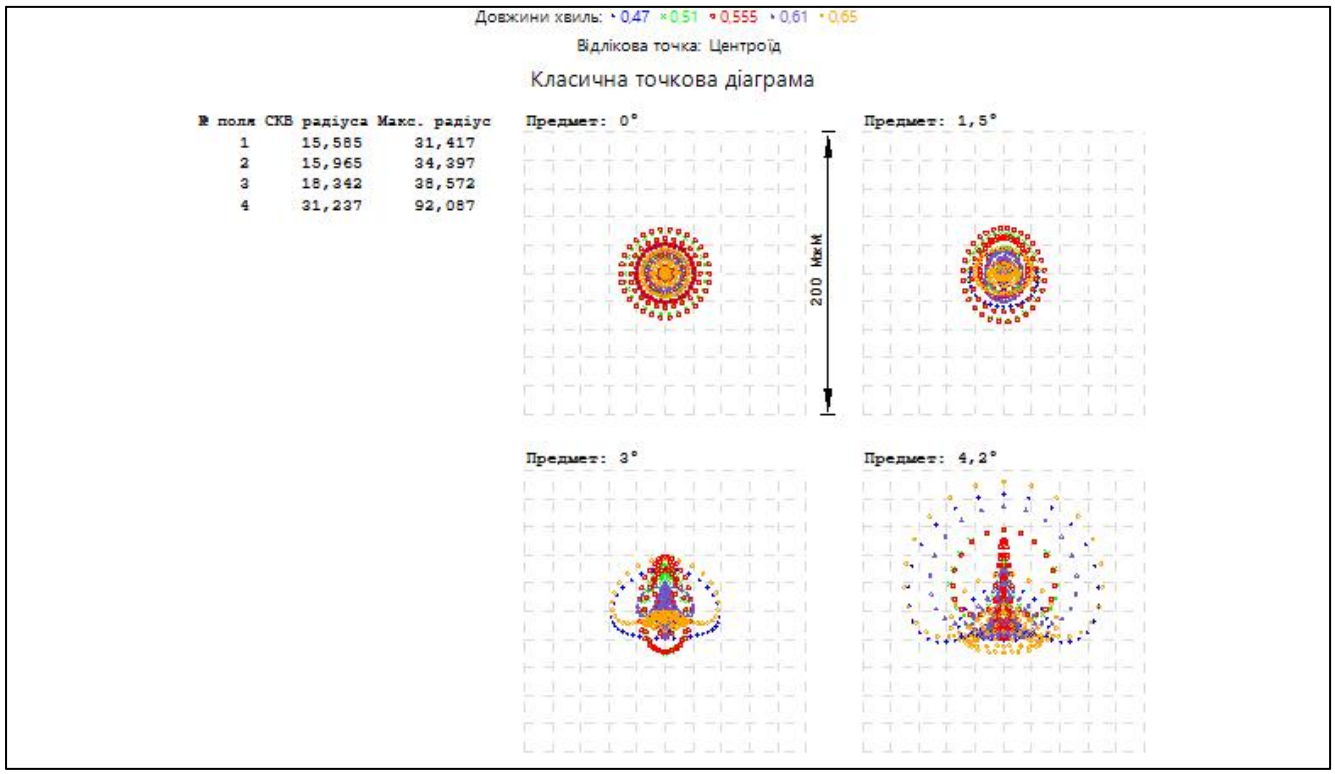


Рисунок 3.8 – Точкові діаграми синтезованого об’єктива

Як видно з рис. 3.8, середньоквадратичне значення радіусів світлових плям не перевищує 32 мкм.

Про високу якість зображення одержаної оптичної системи свідчить також графік передавальної функції поліхроматичної модуляції, представлений на рис. 3.9.

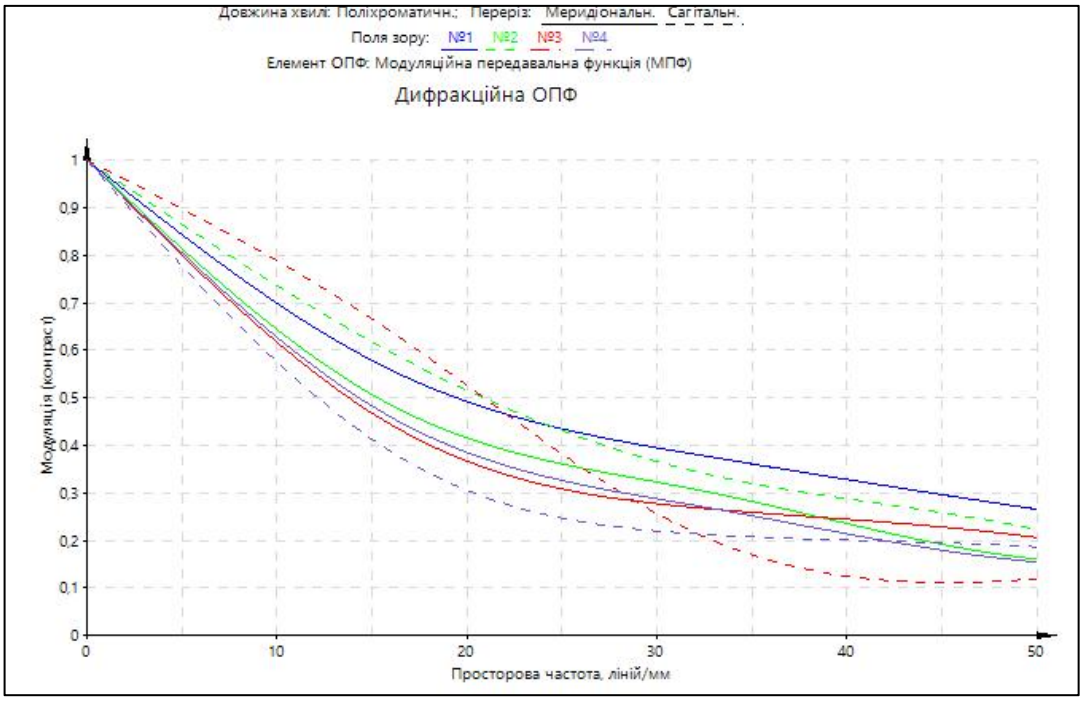


Рисунок 3.9 – Графіки поліхроматичних модуляційних передавальних функцій об’єктива; суцільні – меридіональні площини; пунктирні – сагітальні

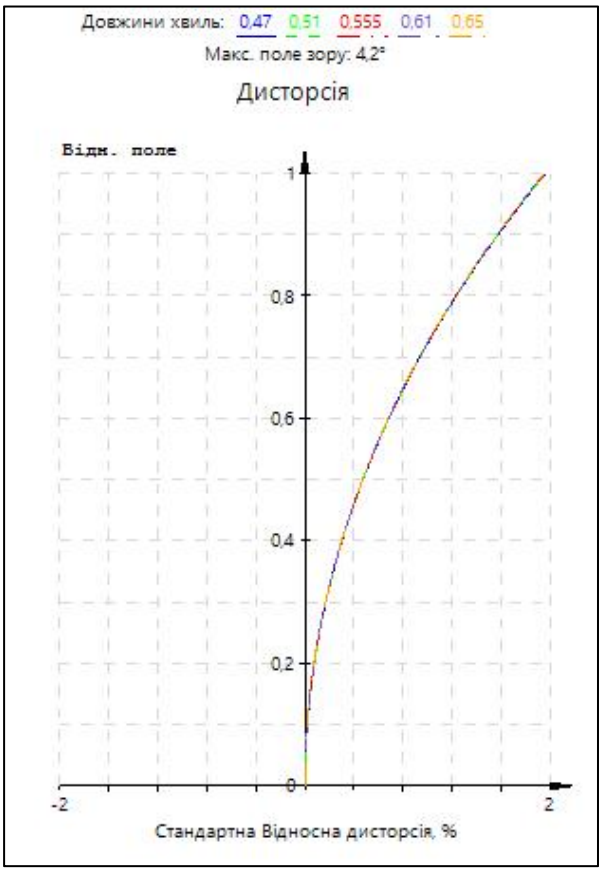


Рисунок 3.10 – Графік дисторсії синтезованого об’єктива

Як видно, дисторсія не перевищую 2%.

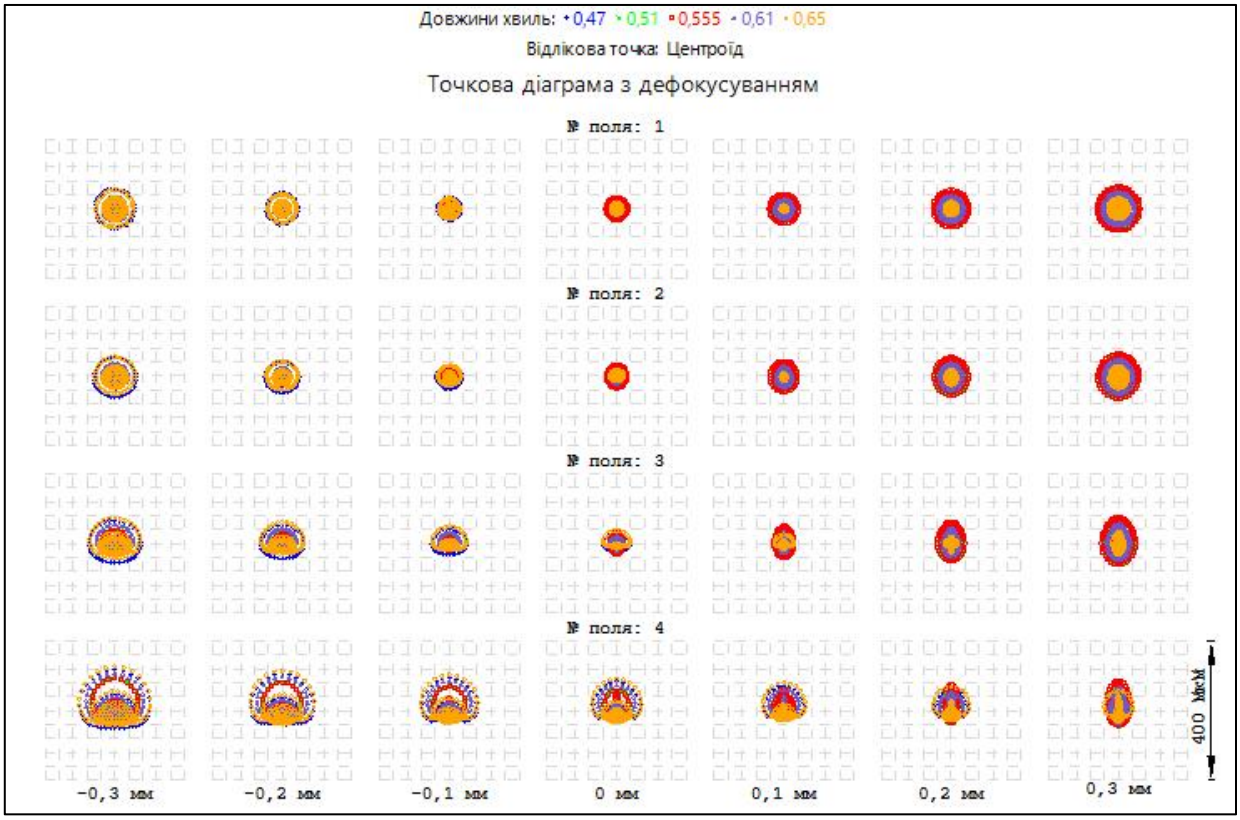


Рисунок 3.11 – Точкові діаграми з дефокусуванням об’єктива

3.4.2. Параметричний синтез серії 16-лінзових ортоскопічних телеоб’єктивів

Для проведення чисельних досліджень в даній роботі було обрано 16-лінзові ортоскопічні телеоб’єктиви з фіксованою задньою фокусною відстанню 300 мм, діафрагмовим числом F/2,8 та кутовим полем зору 8,4°. Ці телеоб’єктиви призначені для функціонування у видимому спектральному діапазоні з основною довжиною хвилі 0,555 мкм.

Вагові коефіцієнти для всіх п’яти використаних довжин хвиль (0,47; 0,51; 0555; 0,61 і 0,65 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 відрізку – 58 мм, мінімальну та максимальну осьові товщини лінз – 2,8 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°.

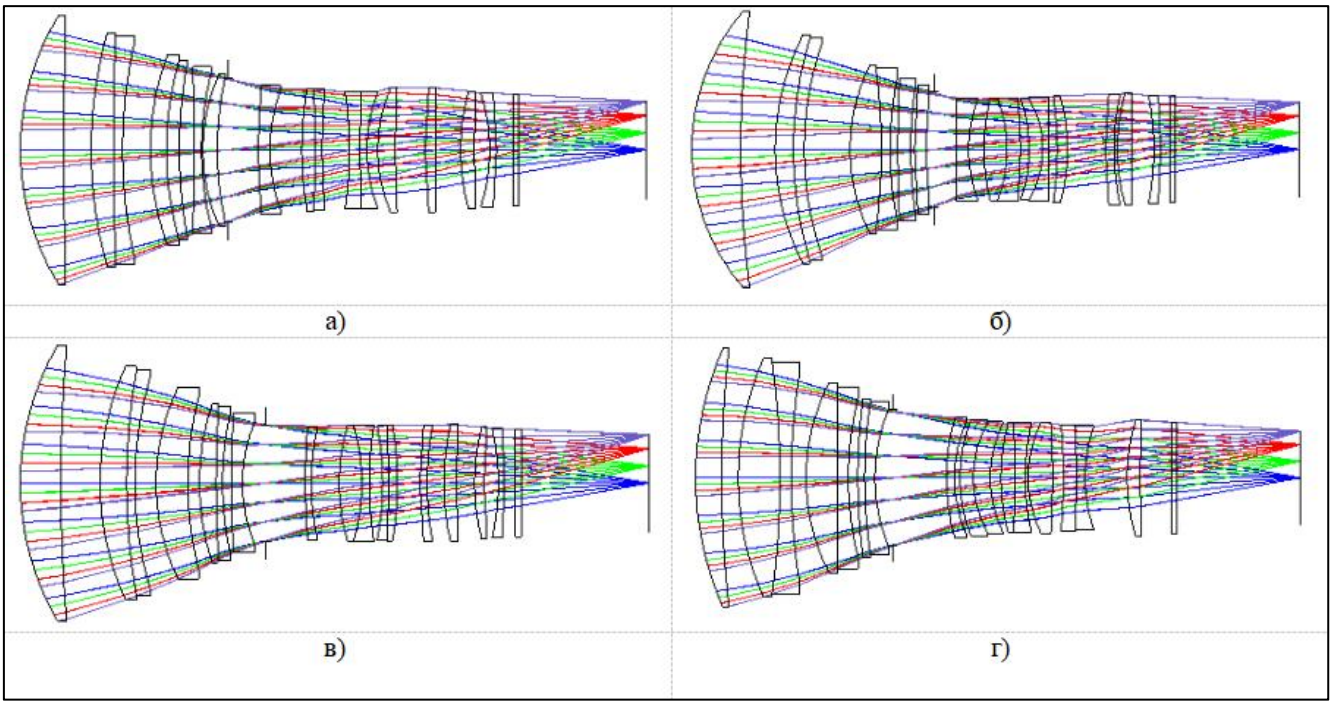


Рис. 3.12. Схеми з ходом променів розроблених оптичних систем 16-лінзових ортоскопічних телеоб’єктивів

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 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 багатопоточному режимі та оптимізації значень модуляційних передавальних функцій процедура синтезу може перевищувати 50 годин.

На рис. 3.12. представлені отримані оптичні схеми декількох варіантів ортоскопічних телеоб’єктивів.

Максимальне по модулю значення відносної дисторсії синтезованих варіантів телеоб’єктивів не перевищує 0,017%. На рис. 3.13 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.

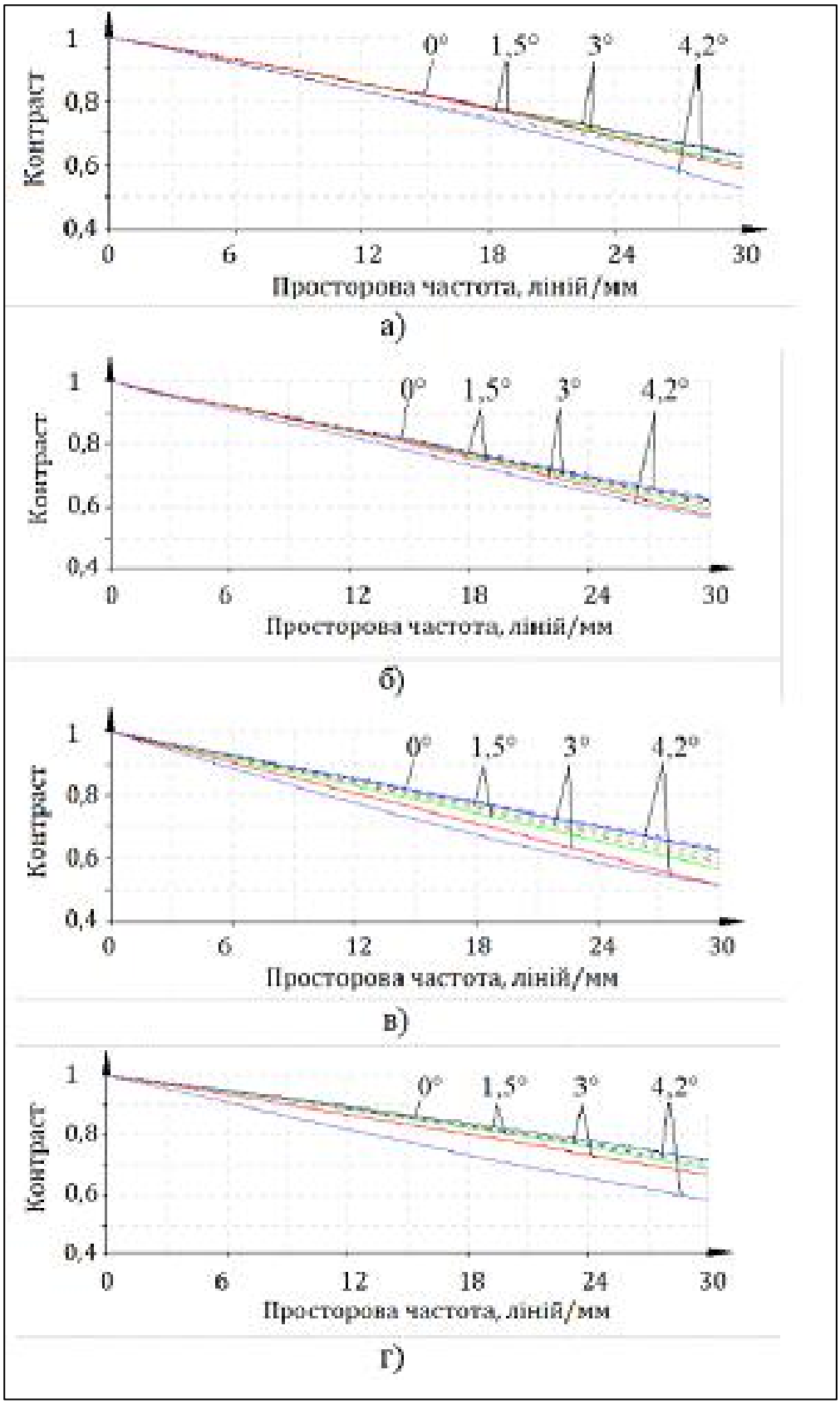


Рис. 3.13. Графіки дифракційних поліхроматичних модуляційних передавальних функцій розроблених варіантів телеоб’єктивів для різних точок поля зору

Як показують залежності, показані на рис. 3.14 і 3.15, якість зображення є добре збалансованою по всьому полю зору.

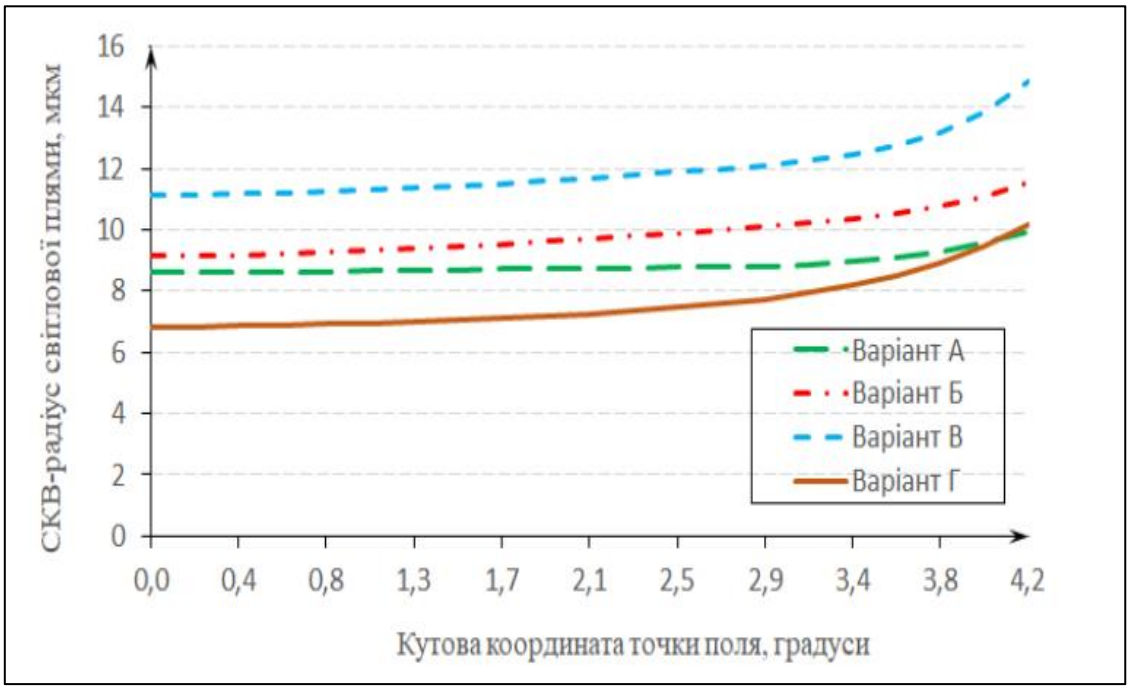


Рис. 3.14. Залежності СКВ-радіусів поліхроматичних світлових плям від кута поля розроблених варіантів телеоб’єктивів

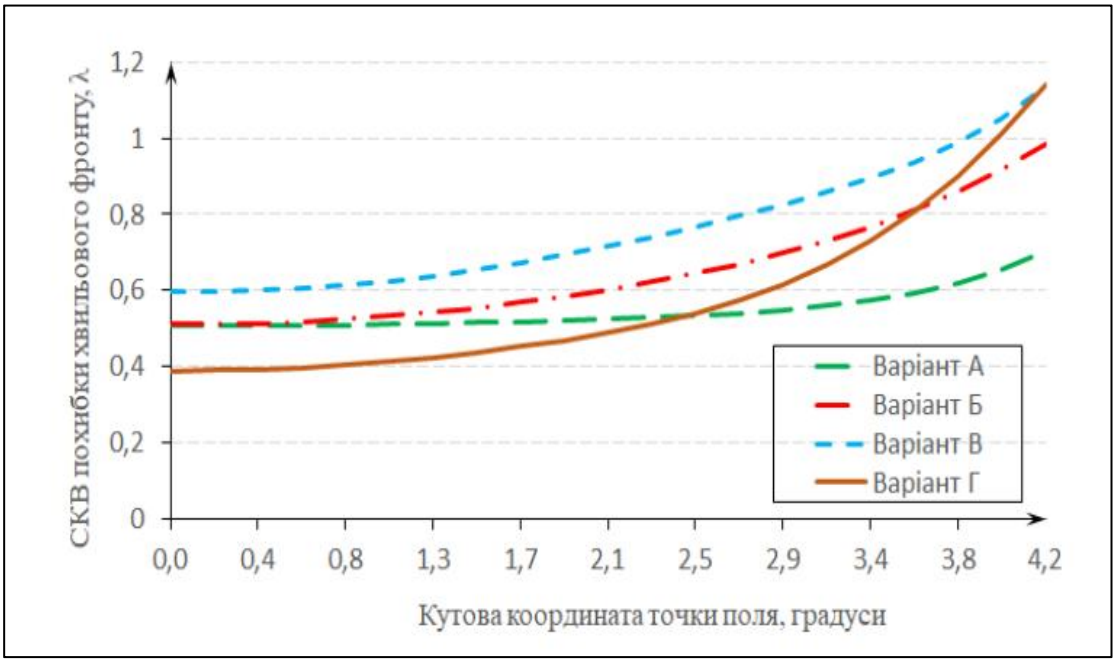


Рис. 3.15. Залежності СКВ похибки поліхроматичної функції деформації хвильового фронту від кута поля розроблених варіантів телеоб’єктивів

Розроблені варіанти 16-лінзових телеоб’єктивів з фокусною відстанню 300мм та відносним отвором 1:2,8 забезпечують високий рівень корекції монохроматичних та хроматичних аберацій для кутового поля зору 8,4° без будь-якого віньєтування 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 світлочутливої площадки біля 44 мм.

Висновки до розділу 3

В даному розділі було здійснено експериментальну перевірку автоматизованого розрахунку оптичних схем довгофокусних об’єктивів з фіксованою фокусною відстанню.

Проведений параметричний та аберaційний синтез оптичної системи 12-лінзового телеоб’єктива та серії 16-лінзових телеоб’єктивів підтверджує на практиці можливість виконання автоматизованого розрахунку з використанням спеціалізованого програмного забезпечення. Використання тагого забезпечення суттєво спрощує на практиці проєктуання оптичних систем з урахуванням заданих параметрів та конструктивних обмежень.

Отримані результати вказують на високу якість зображення синтезованих телеоб’єктивів.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

4.1. Опис ідеї проєкту

У попередньому розділі було виконано параметричний синтез аберацій оптичної системи телеоб'єктива для спостереження віддалених об'єктів з високою якістю. У цьому розділі наведено можливі варіанти стартап-проєкту на основі даних, отриманих у попередньому розділі.

Ідея цього проєкту полягає у застосуванні вибраного алгоритму глобальної оптимізації для автоматичної розробки оптичної системи телеоб'єктивів.

До цього часу існувало кілька основних методів розрахунку оптичних систем, як - от синтез оптики третього порядку з урахуванням теорії аберацій. Недоліком цього підходу є те, що розрахунки з використанням елементів з відомими аберраційними властивостями можуть дати якісні результати тільки для оптичних систем за скромних припущень про відносну апертуру і поле зору. Однак, хоча цей метод вимагає значного досвіду проєктувальника, проте гарантує отримання якісних або прийнятних результатів при використанні методів локальної оптимізації попередньо розрахованих оптичних систем. Цей метод дає якісні результати, але вихідна система має бути близька до кінцевого рішення.

У стартовому проєкті було ухвалено рішення синтезувати оптичну систему за допомогою спеціального програмного забезпечення. Він показує зміст ідеї та потенційний потенціал ринку для пошуку потенційних груп клієнтів. Наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Опис ідеї стартап-проєкту

<table>
<tr><th>Зміст ідеї</th><th>Напрямки застосування</th><th>Вигоди для користувача</th></tr>
<tr><td rowspan="4">Синтезувати оптичну систему телеоб’єктива</td><td>Військова галузь</td><td rowspan="4">Висока якість зображення.
Спостереження за віддаленими об’єктами.
Добре виправлена аберація</td></tr>
<tr><td>Фотоапаратура</td></tr>
<tr><td>Відеоапаратура</td></tr>
<tr><td>Геодезія</td></tr>
</table>

Телеоб'єктиви зазвичай використовуються у спеціалізованих пристроях та мають обмежене застосування. Наприклад, геодезія, фото- та відеотехніка.

Потім проводиться аналіз потенційних технічних та економічних переваг ідеї, порівняно з пропозиціями конкурентів.

—визначено техніко-економічні характеристики ідеї та перелік характеристик;

- визначити попереднє коло конкурентів (конкурсних проєктів) або альтернативних чи аналогічних продуктів, які вже існують на ринку, та зібрати інформацію про значення техніко-економічних показників для власних проєктів та ідей конкурсних проєктів, визначених вище,за цим переліком;

− проводиться порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2

Визначення сильних, слабких та
нейтральних характеристик ідеї проєкту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона	S (сильна сторона)
		Мій проєкт	Tele Vue Optics	Celestron	Explore Scientific			
1.	Вартість програмного забезпечення	Безкоштовно	>1000 $	>1000 $	>1000 $			+
2.	Компактність	+	+	+	+		+	
3.	Кут поля зору	10º	9º	9º	9º			+
4.	Віддалення зіниці	300 мм	300 мм	300мм	300 мм		+	
5.	Аберації	<1%	-	-	-			+

Як видно з таблиці 4.2, сильними сторонами цього проєкту є вільне програмне забезпечення, малі кути огляду та малі значення аберацій. Нейтральний аспект як компактність і віддаленість зіниці.

4.2. Технологічний аудит ідеї проєкту

Цей крок допомагає здійснити аудит технологій, які можна використовувати для реалізації ідеї створення проєкту.

Визначення технічної реалізації ідеї проєкту вимагає аналізу компонентів, перелічених у таблиці 4.3 нижче.

Таблиця 4.3

Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№ п/п	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Синтез оптичної системи телеоб’єктива	Автоматизований розрахунок	Наявні	Доступні
2.		Оцінка якості готового зображення	Наявні	Доступні
3.		Оптимізація та покращення реальних систем	Наявні	Доступні
4.		Розрахунок на базі теорії аберацій третього та п’ятого порядків	Наявні	Доступні
Обрано дві технології реалізації ідеї: автоматизований розрахунок та якісна оцінка готового зображення.				

Коли застосовується метод автоматичного розрахунку, вихідна система може бути встановлена на плоско паралельну пластину, а вихідний сигнал може бути отриманий за допомогою високо якісної оптичної системи. Додатково такий підхід використовується виключення можливого впливу людського чинника на кінцевий результат. Також було ухвалено рішення використати

методики оцінки якості готового зображення. Після того, як промінь проходить через оптику. Ця технологія використовується для оцінки якості зображення та порівняння з іншими аналогічними системами конкурентів.

Проаналізувавши табл. 4.3, можна підбити підсумки. Методика автоматичного розрахунку значно полегшує розрахунок оптичної системи, а методика оцінки якості готового зображення дозволяє оцінити якість розрахункової системи та порівняти його з якістю системи. Головний конкурент. Крім того, великою перевагою є те, що пропонований проєкт використовує безкоштовне програмне забезпечення, тоді як конкуренти використовують платне програмне забезпечення.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

У цьому підрозділі визначаються ринкові можливості, які можуть бути використані при реалізації проєкту на ринку, та ринкові загрози, які можуть призвести до невдачі під час реалізації проєкту.

Аналіз попиту (наявність попиту, обсяг та динаміка розвитку ринку) представлений у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	410-475 млн. дол.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні

6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	17%

Проаналізувавши ринок, можна дійти невтішного висновку, що потенційний ринок дуже привабливий для входу, оскільки динаміка ринку зростає і обмежень на вхід немає.

Далі визначаються групи потенційних клієнтів та його характеристики. Також кожної групи покупців складається приблизний перелік вимог до продукції (таблиця.4.5).

Таблиця 4.*5*

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Необхідність в високоякісних оптичних системах	Військові	Якість, надійність, зручність. Економічна складова, мобільність, висока точність зображення	Приваблива ціна, легкість використання. Гарантія якості, подальший сервіс
		Фото- та відео-автори		
2.	Потреба надійному обладнанні	Працівники наукових галузей		

Як видно з таблиці 4.5, основною цільовою аудиторією є відео-редактори та працівники різних наукових галузей.

Таблиця 4.6

Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Компанії конкуренти - міжнародні	Реалізація проєкту на міжнародній арені може бути складною	Створення простішого методу
2.	Вихід на ринок більш відомих компаній	Вихід на ринок компаній які мають відомий бренд та які уже мають довіру клієнтів	Співпраця з маловідомими компаніями, які ще не вийшли на ринок
3.	Складність виходу на вітчизняний ринок	Порівняно низький інтерес цивільного населення до астрономії	Робити нахил на наукову галузь
4.	Поведінка конкурентних компаній	Можливе зниження ціни на продукцію	Вдосконалення власної продукції, можливе зниження ціни

Аналіз факторів загрози показав, що складність виходу на ринок полягає, перш за все, у непередбачуваній поведінці вже добре відомих на ринку конкурентів. Також на внутрішньому ринку інтерес до геодезії серед цивільного населення є досить низьким, тому пріоритет слід віддавати відео-авторам. Це означає, що нам потрібно зосередитись на ширших категоріях.

Наступним кроком є аналіз можливостей (таблиця 4.7).

Таблиця 4.7

Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Потреба клієнтів дешевому та сучасному обладнанні	Велика кількість споживачів потребує дешеве та результативне обладнання	Створення простих та доступних моделей
2.	Розширення ряду продукції	Програмне забезпечення дозволяє конструювати різні оптичні системи високого рівня складності	Більш тонка розробка оптичних систем під різні потреби та обмеження
3.	Відсутність компаній в Україні	На вітчизняному ринку, наразі, немає технічної підтримки та представництв інших відомих компаній	Відносно вільний ринок держави, де розробляється продукт, сприяє можливості для реалізації та технічної підтримки
4.	Нові потреби споживачів	Нові потреби споживачів у схожих сферах стимулюють вдосконалення нової продукції	Розробка нових продуктів та вдосконалення старих, щоб задовольняти нові потреби споживачів

Аналіз факторів можливості показав, що відсутність аналогічних компаній на внутрішньому ринку дає можливість зайняти головні позиції для подальшого розвитку та виведення продукту на світовий ринок. Існують також можливості виходу ринку вже реальних компаній шляхом створення більш простих і дешевих підходів.

Потім пропозиції аналізуються. (таблиця 4.8)

Таблиця 4.8

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Монополістична конкуренція	Галузь є конкурентоспроможною, проте існує декілька явних лідерів	Проведення рекламних заходів для популяризації бренду
2. Глобальний рівень конкурентної боротьби	Компанії конкуренти з різних країн світу	Здобуття першості на вітчизняному ринку та отримання міжнародних патентів
3. Внутрішньогалузева конкуренція	Конкуренція спостерігається лише в галузі оптичного проєктування	Розробка якіснішої та доступнішої продукції
4. Товарна конкуренція	Конкуренція між товарами одного виду	Створення якіснішої та доступнішої продукції
5. Ціновий характер	Продукція є досить дорогою	Зменшити вартість продукції

6. Марочний характер	Для споживачів має значення бренд	Популяризувати власну продукцію

Покроковий аналіз ринкової конкуренції, по даних у таблиці.4.8 показав, що наявність відомих конкурентів на світовій арені деякою мірою ускладнює вихід на ринок. Однак пропонований проєкт має можливість завоювати перше місце на внутрішньому ринку та певний відсоток світового ринку завдяки підвищенню доступності та якості продукції.

Таблиця 4.9

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Zemax, OpticStudio, Code V	Виробники окремих складових оптичних систем	Мають значені обсяги поставок	Торгові знаки, прибутки, система інформації	Використання більш застарілих зразків
Висновки	На вітчизняному ринку конкуренції майже нема	Вихід на ринок за рахунок реклами та гнучкості цін	Постачальники не впливають на роботу ринку	Клієнти надають перевагу відомим брендам та низькій ціні	Товари-замінники існують, однак вони не дають бажаного результату

Після аналізу конкурентного ринку, представленого в Таблиці 4.9, можна дійти невтішного висновку, що бар'єрів для виходу внутрішній ринок небагато, але є деякі проблеми з виходом на міжнародний ринок. проєкти повинні не лише

відповідати вимогам споживачів щодо якості та ціни, а й мати певний маркетинговий потенціал.

Після всього аналізу визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 4.10

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
1.	Потреби споживачів	Потреби споживачів обумовлюють необхідність розробки проєкту
2.	Ціна продукції	Ціна продукту повинна бути меншою, ніж ціни компаній конкурентів
3.	Маркетинговий потенціал	Можливе створення імені на внутрішньому ринку з подальшими рекомендаціями на світовому ринку
4.	Простота експлуатації	Підхід є простим та з малими потребами у кваліфікації до користувачів
5.	Технічне обслуговування	Технічна допомога та після продажне обслуговування клієнтів

Продемонструвавши чинники, подані у таблиці 4.10, можна дійти невтішного висновку, що є кілька чинників, визначальних необхідність розвитку проєкту, а саме, споживчий попит на продукти, доступність та після продажне обслуговування клієнтів.

Таблиця 4.11

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з розробленим проєктом						
			–3	–2	–1	0	+1	+2	+3
1.	Потреби споживачів	9							
2.	Ціна продукції	17		+					
3.	Маркетинговий потенціал	16						+	
4.	Простота експлуатації	18		+					
5.	Технічне обслуговування	9					+		

З таблиць 4.10 та 4.11 видно, що слабкою стороною проєкта є маркетинговий потенціал. Сильними факторами конкурентоспроможності можна назвати ціну продукції та простоту експлуатації.

Таблиця 4.12

SWOT- аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони: 1. Порівняно низька ціна продукції; 2. Простота експлуатації; 3. Технічне обслуговування.	Слабкі сторони: 1. Невпізнанність компанії; 2. Основні конкуренти мають більший ряд послуг і продукції.
Можливості: 1. Можливість здобуття лідерства на	Загрози: 1. Поява нових гравців на ринку;

вітчизняному ринку; 2. Вихід на міжнародний ринок; 3. Удосконалення методу розрахунку.	2. Слабка рекламна компанія; 3. Нові розробки конкурентів.

З SWOT-аналізу, показаного в таблиці 4.12, можна зробити висновок, що сильними сторонами проєкту є відносно низька вартість та простота експлуатації та обслуговування. Слабкі сторони цього проєкту включають початкову нездатність довідатися про компанію та широкий спектр послуг та продуктів конкурентів. Ринкові можливості та загрози є результатом впливу факторів та мають певну ймовірність реалізації. Основні можливості - це можливість завоювання лідерства на внутрішньому ринку, подальшого виходу на міжнародний ринок та вдосконалення методики розрахунку. Загрози включають появу нових конкурентів, слабких рекламодавців та потенційні нові розробки конкурентів.

Таблиця 4.13

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Проведення рекламної кампанії	65%	5-9 міс.
2.	Прийняття участі у міжнародних конференціях	45%	3-12 міс.
3.	Розповсюдження продукції у вітчизняних установчих зі зниженою вартістю	25%	4-7 міс.
4.	Співпраця з навчальними закладами та надання ї послуг зі зниженою вартістю	20%	1-2 міс.
5.	Розширення групи	70%	3-8 міс.

	товарів		

На основі SWOT-аналізу були розроблені варіанти ринкових дій для виведення стартап-проєктів на ринок та передбачувані терміни їх реалізації, як показано в таблиці 4.13. З усіх варіантів було обрано розширення групи товарів, оскільки це було можливим придбанням ресурсів.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту

Розроблення ринкової стратегії передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп споживачів.

Таблиця 4.14

Вибір цільових груп споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Геодезія	Готові	200 копій	Середня	Середня
2.	Відео-оператори	Готові	300 копій	Середня	Середня
3.	Військова галузь напрямків	Готові	100 копій	Середня	Середня
Які цільові групи обрано: Відео-оператори.					

В результаті виділення цільової групи потенційних споживачів, як показано в таблиці 4.14, можна дійти невтішного висновку, що відео-редактори є найперспективнішими. Проте, компанія планує продавати свою продукцію і в

інших галузях. Диференційовану маркетингову стратегію було обрано тому, що компанія працює з кількома сегментами.

Таблиця 4.15

Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Розширення групи товарів	Нижча вартість товару в порівнянні з компаніями конкурентами	Більша кількість продукції та низька ціна на неї	Стратегія диференціації

В результаті визначення базової стратегії розвитку, показаної в таблиці 4.15, було прийнято рішення дотримуватися стратегії диференціації, оскільки продукт використовуватиметься у багатьох галузях. Вибрана стратегія є найбільш влучною, оскільки знижує ступінь взаємної замінності продукту, знижує чутливість до ціни та підвищує прибутковість по відношенню до прямих конкурентів.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки.

Таблиця 4.16

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати реальних у	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару	Стратегія конкурентної поведінки*

		конкурентів?	конкурента, і які?	
1.	Ні, оскільки конкуренти мають схожий підхід	Компанія буде забирати реальних користувачів та залучати нових	Так, оскільки оптимізаційна модель в усіх компаній схожа	Стратегія позиції

Після визначення базової стратегії конкурентної поведінки, поданої у таблиці . 4.16 було прийнято рішення про вибір стратегії позиціювання. Компанія розповідає, чим продукт відрізняється від конкурентів, його унікальність та переваги, які він приносить споживачам— позиціювання з погляду технологічних характеристик, важливих для споживачів.

Таблиця 4.17

Визначення стратегії позиціювання

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту (три ключових)
1.	Висока якість	Стратегія диференціації	Використання сучасного програмного забезпечення дозволяє просто та дешево отримати якісний кінцевий результат	Висока якість, низька ціна, простота
2.	Низька ціна			
3.	Простота			

Після визначення стратегії позиціювання, представленої в таблиці 4.17, можна дійти невтішного висновку, що основними вимогами цільових

користувачів до продукту є висока якість, низька ціна і простота. Ключова конкурентна позиція дає змогу відповідати цим вимогам.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту

Початковим кроком маркетингової програми є розробка маркетингової концепції товару, таблиця 4.18.

Таблиця 4.18

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (реальні або такі, що потрібно створити)
1.	Якісні оптичні системи телеоб'єктивів	Висока якість зображення, доступна ціна та простота використання	Висока якість зображення. Під час синтезу оптичної системи, застосовувалось сучасне програмне забезпечення, яке може використовуватися для складніших систем у майбутньому

Таблиця 4.19

Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Телеоб'єктив		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Якість зображення 2. Простота використання 3. Технічне обслуговування 4. Низька ціна	Нм Нм М М	Тх Е Тх Е
	Якість: стандарти, нормативи		
	Пакування: футляр який знаходиться в коробці з		

	пінопластом
	Марка: GlobalOptic
III. Товар із підкріпленням	До продажу: не потребує навичок
	Після продажу: гарантія протягом 12 місяців та підтримка клієнтів
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: за рахунок патенту на корисну модель, комерційної таємниці.	

Формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач, дало змогу побачити, що споживачі, у яких буде впроваджено даний стартап-проєкт, будуть задоволені.

Опис трьох рівнів моделі товару, наведений в таблиці 4.19, дає змогу досить чітко уявити продукт. Перевагами продукту є висока якість зображення, простота використання, технічне обслуговування та доступна ціна.

Таблиця 4.20

Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари замінники	Рівень цін на товари аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	$500-900	$600-1000	$600-1500	$150-700

Після аналізу рівня цін на продукцію компаній конкурентів та рівня доходів цільової групи споживачів, було визначено межі встановлення ціни, наведені в таблиці 4.20. Оптимальною нижньою межею є $150, а верхньою межею $700. Встановлені межі дають перевагу перед продукцією компанії конкурентів.

Як видно з таблиці 4.21, зазначені функції збуту та глибина каналу формують оптимальну систему збуту, що відбуватиметься однозначно через сайт

компанії розробника. Через це можна достатньо просто встановлювати контакти зі споживачами та здійснювати їх подальшу підтримку.

Таблиця 4.21

Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	На сьогоднішній день, споживачі купують продукцію безпосередньо у компанії розробника	Встановлення контактів зі споживачами.Розробка та реалізація програм з підтримки лояльності споживачів	Виробник продає товар безпосереднью споживачу (канал нульового рівня)	Збут продукції відбувається через сайт компанії розробника

Таблиця 4.22

Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуютьс я цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціювання	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення

1.	Клієнти дізнаються про нову продукцію з реклами в інтернеті, сайту розробника, наукових конференцій та за рекомендаціями інших	Соціальні мережі, форуми, публікації, інтернет.	SMM, контент-маркетинг	Представлення товару та його позиціювання для залучення нових клієнтів	"Доступна ціна та висока якість у кожному продукті"

Так як цільова аудиторія отримує більшу частину інформації про нову продукцію через мережу інтернет, тому доцільними ключовими позиціями було обрано SMM та контент-маркетинг, як видно з таблиці 4.22. Основною метою рекламного повідомлення є позиціювання продукції та зацікавлення нових споживачів.

Висновки до розділу 4

В даному розділі було проведено ретельний аналіз ринку споживачів, який дає змогу зрозуміти наступні позитивні моменти:

- Попит на продукцію присутній, це підтверджує потреба споживачів у якісній продукції та позитивна динаміка ринку.
- Місце на світовому ринку є, але все ж ліпше починати з вітчизняного.
- Головні споживачі - це відео-оператори, яким потрібна висока якість при спостереженні за віддаленими об’єктами.

Здійснення запропонованого проєкта є доцільним, оскільки технології та проєкти в області розробки об’єктивів розвиваються і скоріш за все будуть популярними і у майбутньому.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Основною перевагою використання телеоб’єктивів є можливість отримання високоякісних зображень віддалених об’єктів. Це зумовлює широкий спектр застосування телеоб’єктивів в різних галузях, таких як спорт, спостереження за тваринами в дикій природі та найголовніше і найактуальніше в наш час – військова справа, адже можна спостерігати за ворогом, мати розвідувальні дані високої якості та залишатися непоміченим.

2. В результаті проведеного аналізу встановлено переваги та недоліки методів локальної оптимізації. Такі методи потребують якісної стартової системи. Тому їх доцільно застосовували лише на завершальних етапах проєктування оптичних систем. Для автоматизації процедури проєктування складних багатолінзових систем потенційно можна використати сучасні ефективні методи глобальної оптимізації.

3. Параметричний та аберaційний синтез оптичної системи 12- лінзового телеоб’єктива та серії 16-лінзових телеоб’єктивів, проведений за модифікованим методом диференціальної еволюції, підтверджує на практиці можливість виконання автоматизованого розрахунку з використанням спеціалізованого програмного забезпечення. Отримані результати вказують на високу якість зображення синтезованих телеоб’єктивів.

4. Розробка стартап-проєкту дала змогу зрозуміти такі позитивні речі:

- Є попит на продукцію.

- ліпше починати з вітчизняного ринку.

- Головні споживачі - це відео-оператори..

Здійснення запропонованого проєкта є доцільним, оскільки технології та проєкти в області розробки об’єктивів розвиваються і скоріш за все будуть популярними і у майбутньому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Велика норвезька енциклопедія.

2. Stroebel, Leslie; Zakia, Richard D. (1993). The Focal Encyclopedia of photography.

3. Keller, Max (1999). У Weiss, Johannes. Light Fantastic: The Art and Design of Stage Lighting. Prestel. с. 71.

4. Chris Velzel, A Course in Lens Design / William T. Rhodes, Georgia Institute of Technology – 2014. – 177 p.

5.Rudolf Kingslake, R. Barry Johnson. Lens Design Fundamentals: Second Edition – 2009. – 388 p.

6. Bentley J., Craig Olson C. Field Guide to Lens Design. SPIE Field Guides. Volume FG27. SPIE. 2012. 141 p.

7. Laikin M. Lens Design (Optical Science and Engineering). 4th Edition. CRC Press. 2006. 512 p.

8. Malacara D., Malacara Z. Handbook of Lens Design. Taylor & Francis, 1994. 672 p.

9. Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration Theory and Correction of Optical Systems. / H. Gross, H. Zugge, M. Peschka, F. Blechinger; Edited by Herbert Gross. – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. – 2014. – 780 p.

10. Understanding Focal Length [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.nikonusa.com/en/learn-and-explore/a/tips-and-techniques/understanding-focal-length.html#

11. Nikkor AF-S 300mm f/4E PF ED VR Overview [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.dpreview.com/products/nikon/lenses/nikon_300mm_f4_pf_ed_vr

12. AF-S Nikkor 300mm f/4.0E PF ED VR [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://photographylife.com/reviews/nikon-300mm-f4e-pf-ed-vr

13. Nikon AF-S Nikkor 300mm f/4D ED-IF Overview [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://imaging.nikon.com/lineup/lens/f-mount/singlefocal/Telephoto/af-s_300mmf_4d_if/index.htm

14. Nikon AF-S Nikkor 300mm f/4D ED-IF [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.dpreview.com/products/nikon/lenses/nikon_300_4d_if/overview

15. Canon EF 300mm f/4L IS USM Lens Overview [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.canon.co.uk/lenses/ef-300mm-f-4l-is-usm-lens/specification.html

16. Canon EF 300mm f/4L IS USM Lens [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.bhphotovideo.com/c/product/129188-USA/Canon_2530A004_Telephoto_EF_300mm_f_4_0L.html/specs

17. Canon EF 600mm f/4.0L IS USM Overview [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.canon.ua/lenses/ef-600mm-f-4l-is-iii-usm/

18. Canon EF 600mm f/4.0L IS USM [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.dpreview.com/products/canon/lenses/canon_600_4p0_is/overview

19. Canon EF 600mm f/4L IS III USM Overview [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.canon.ua/lenses/ef-600mm-f-4l-is-iii-usm/specifications/

20. Canon EF 600mm f/4L IS III USM [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.bhphotovideo.com/c/product/1433722-REG/canon_ef_600mm_f_4l_is.html

21. Локальний пошук (оптимізація) [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Локальний_пошук_(оптимізація)

22. Battiti, Roberto; Mauro Brunato; Franco Mascia (2008). Reactive Search and Intelligent Optimization. Springer Verlag. ISBN 978-0-387-09623-0. Archived from the original on 2012-03-16.

23. J. Dréo, A. Pétrowski, P. Siarry, E. Taillard, Métaheuristiques pour l‟optimisation difficile, Eyrolles, 2003, ISBN 2-212-11368-4.

24. C. Blum, A. Roli, Metaheuristics in combinatorial optimization : Overview and conceptual comparison, Journal ACM Computing Surveys (CSUR) Surveys Homepage archive, Volume 35, Issue 3, September 2003

25. I. C. Trelea, The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection, Information Processing Letters, Vol. 85, pp. 317-325, March 2003

26. Координатний спуск [Електронний ресурс] – Режим доступу:https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BE%D1%80%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D1%81%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA

27. J. C. Spall, Introduction to Stochastic Search and Optimization, Wiley-Interscience, 2003, ISBN-10 0471330523

28. Симплекс метод [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D0%BC%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81-%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4

29. J. F. Bonnans, J. C. Gilbert, C. Lemaréchal, C. A. Sagastizábal, Numerical optimization: theoretical and practical aspects, Springer, 2003, ISBN-10: 3540001913

30. Y. Favennec, P. Le Masson, Y. Jarny, Lecture 7 – Optimization methods for non linear estimation or function estimation, Metti 5 – Thermal Measurements and Inverse Techniques, Advanced Spring School, Roscoff, June 13-18, 2011

31. F. H. Walters, L. R. Parker, S. L. Morgan and S. N. Deming, Sequential simplex optimization, CRC Press, Boca Raton, FL, 1991, ISBN-8493–5894–9 (available online)

32. Найшвидший спуск [Електронний ресурс] – Режим доступу:https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D0%B0%D0%B4%D1%96%D1%94%D0%BD%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D1%81%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA

33. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт; пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 509 с.

34. Растригин Л.А. Статистические методы поиска / Л.А. Растригин. – М.: Наука, 1968. – 376 с.

35. Kirkpatrick S. Optimization by simulated annealing / S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P. Vecchi // Science, New Series. – 1983. – Vol. 220. – No. 4598. – P. 671–680.

36. Golino G. A genetic algorithm for optimizing the segmentation in subarrays of planar array antenna radars with adaptive digital beamforming / G. Golino // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. – 2003. – P. 211–216.

37. Choo H. Design of electrically small wire antennas using genetic algorithm taking into consideration of bandwidth and efficiency / H. Choo, R. Rogers, H. Ling // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – 2002. – Vol. 1. – P. 330–333.

38. Метод найменших квадратів [Електронний ресурс] – Режим доступу:https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4_%D0%BD%D0%B0%D0%B9%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%88%D0%B8%D1%85_%D0%BA%D0%B2%D0%B0%D0%B4%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%96%D0%B2

39. Метод найменших квадратів [Електронний ресурс] – Режим доступу:https://uofa.ru/uk/metod-naimenshih-kvadratov-lineinaya-funkciya-approksimaciya/

40. M. Clerc, Particle swarm optimization, Paris, Wiley-ISTE, 2006, ISBN-10: 1905209045

41. D. Petit, D. Maillet, Techniques inverses et estimation de paramètres. Partie 1, Techniques de l‟Ingénieur, AF4515

42. C. Porte, Méthodes directes d‟optimisation - Méthodes à une variable et Simplex, Techniques de l‟Ingénieur, P228

43. Глобальна оптимізація [Електронний ресурс] – Режим доступу:https://hmn.wiki/uk/Global_optimization

44. Сокуренко В.М., Неділюк В.С. Розробка оптичних систем засобами глобальної оптимізації. // Сборник научных трудов SWorld. – Выпуск 2. Том 5. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. – ЦИТ: 213-247. – С. 48-52.

45. T. Weise, Global Optimization Algorithms – Theory and Application, e-book, 2008, www.itweise.de/projects/book.pdf, October 2009

46. Сокуренко В. М. Числове дослідження стохастичних методів безперервної глобальної оптимізації / В. М. Сокуренко, В. С. Неділюк // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2012. – № 1. – С. 81-88.

47. Газизов Т.Т. Сравнение методов глобальной оптимизации / Т.Т. Газизов // XVI Туполевские чтения: матер. Междунар. молодежной научной конф. – Казань, 2008. – С. 219–221.

48. Алгоритм імітаційного відпалу [Електронний ресурс] – Режим доступу:https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%

49. Сокуренко В. М., Макаренко Я. І. Розробка оптичних систем методами глобальної оптимізації // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – 2015. – № 50(2) – с. 51-60.

50. Метод Монте-Карло [Електронний ресурс] – Режим доступу:https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4_%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%B5-%D0%9A%D0%B0%D1%80%D0%BB%D0%BE

51. Сокуренко 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.

52. R. Storn, "Differential Evolution, A Simple and Efficient Heuristic Strategy for Global Optimization over Continuous Spaces", Journal of Global.

53. K. Price, New Ideas in Optimization, Graw-Hill Publishing Company, p. 77-106, 1999.

54. H.A. Abbass, Ruhl Saker, and Chales Newton. “PDE: A pareto-frontier differential evolution approach for multi-objective optimization problems”. Proceedings, 2001.

55. Метод диференційної еволюції [Електронний ресурс] – Режим доступу:https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D1%84%D0%B5%D1%80

%D0%B5%D0%BD%D1%86%D1%96%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0_%D0%B5%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D1%8E%D1%86%D1%96%D1%8F

56. Карпенко А.П. Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых и малоизвестних алгоритмов. // Информационные технологии. – 2012. - №7. Приложение. – С.1-32.

57. Frank S.A. The design of natural and artificial adaptive systems. N.Y.: Academic Press, M.R.Rose and G.V. Lauder edition, 1996.

58. Оптимізація колективним інтелектом [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D1%96%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82